

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PRODUÇÃO**

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO**  
**SUSTENTÁVEL: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE**  
**AGREGADOS POR LIXO ELETRÔNICO NA**  
**PRODUÇÃO DE CONCRETO**

**Carlos Alberto de Albuquerque**

**Itajubá, dezembro de 2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PRODUÇÃO**

**Carlos Alberto de Albuquerque**

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO**  
**SUSTENTÁVEIS: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE**  
**AGREGADOS POR LIXO ELETRÔNICO NA**  
**PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Carlos Henrique Pereira Mello, Dr.

Co-Orientador: Prof. José Henrique de Freitas Gomes, Dr.

**Dezembro de 2021**

**Itajubá**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PRODUÇÃO**

**Carlos Alberto de Albuquerque**

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO**  
**SUSTENTÁVEIS: ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE**  
**AGREGADOS POR LIXO ELETRÔNICO NA**  
**PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Tese aprovada por banca examinadora em 10 de dezembro de 2021, conferido ao autor o título de **Doutor em Engenharia de Produção**.

**Banca Examinadora:**

Prof. Carlos Henrique Pereira Mello, Dr. (orientador)

Prof. José Henrique de Freitas Gomes, Dr. (co-orientador)

Prof(a). Amanda Fernandes Xavier Pedrosa, Dr(a).

Prof. Carlos Eduardo Sanches da Silva, Dr.

Prof. João Paulo Martins, Dr.

Prof(a). Valquíria Claret dos Santos, Dr(a).

**Itajubá**

**2021**

## **Dedicatória**

À minha esposa Angélica, aos meus filhos Beatriz, Patrícia, Maria Eduarda e Pedro, pela paciência e apoio durante essa longa jornada. Jornada essa que só foi possível terminar com sucesso por causa do apoio e compreensão de vocês.

## **Agradecimentos**

A DEUS, por tudo em minha vida.

À minha esposa Angélica e meus filhos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Henrique Pereira Mello e meu coorientador Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes, pela competência, dedicação e paciência.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de do Sul de Minas Gerais – IFSULDEMINAS.

À Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

## Resumo

Entre as principais preocupações com as questões ambientais, este presente trabalho destaca duas. A primeira é com o resíduo da fração não metálica da placa de circuito impresso (PCI). Esse resíduo, apesar de ter um dos maiores índices de incremento na sua geração, desperta pouco interesse dos recicladores. A segunda questão é o processo de produção do concreto. Não só por utilizar muitos recursos naturais, mas pelo fato do processo de fabricação do cimento *Portland* ser responsável pela geração de grande parte de gases causadores do efeito estufa. Em uma pesquisa realizada por este presente trabalho, não foram identificadas pesquisas que investigassem a substituição de parte dos agregados naturais pela fração não metálica da PCI na produção do concreto. Diante disso este presente trabalho investigou a utilização da substituição de parte dos agregados naturais pela fração não metálica da PCI na produção do concreto. Também foi investigada a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. Para realizar essas investigações, foi realizada uma revisão de literatura, para identificar os tipos de resíduos que estavam sendo utilizados como agregados na produção de concreto e, também, para identificar as percentagens de substituição do cimento *Portland* por cinza volante. Os dados obtidos na revisão de literatura auxiliaram no delineamento experimental. O delineamento foi realizado utilizando a metodologia de experimento com mistura e o método de vértices extremos. Com esse delineamento foram produzidos traços de concreto para investigar a porcentagem de substituição de agregados naturais por lixo eletrônico, que produza concreto que seja classificado como concreto estrutural. Essa investigação foi realizada para traços que utilizaram a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante e para traços que não utilizaram essa substituição. Para fazer essa investigação foram realizados ensaios de *slump* e de resistência à compressão do concreto. Com os dados do experimento foi realizado um teste de hipótese (teste t para duas amostras). O objetivo desse teste é comparar a média da resistência a compressão dos corpos de prova cujos traços substituíram 20% do cimento *Portland* por cinza volante com os corpos de prova cujos traços não realizaram essa substituição. O resultado mostrou que não há diferença estatisticamente significativa entre as duas médias. Outro resultado dos experimentos foi o desenvolvimento de um traço utilizando 20% de cinza volante como substituto do cimento *Portland* e de parte dos agregados por lixo eletrônico, com uma resistência de 23,010 MPa. Também foram desenvolvidos quatro traços, sem cinza volante e com lixo eletrônico, cujos corpos de prova obtiveram resistência à compressão do concreto de 21,804 MPa; 23,329 MPa; 23,614 MPa e 24,637 MPa. Desta forma esses cinco traços produziram concreto estrutural, uma vez que suas resistências são maiores ou iguais a 20 MPa. Finalmente foram realizados ensaios de lixiviação. Para a lixiviação foram realizados uma microscopia eletrônica de varredura nas amostras, teste de condutividade e pH na água onde as amostras ficaram de molho, nos períodos de 24, 72, 168 e 384 horas. O resultado da lixiviação mostrou que não havia elemento químico nos corpos de prova dos experimentos que fossem diferentes dos elementos químicos encontrados nos traços de controle. Também mostrou não haver nenhum elemento tóxico, como chumbo e mercúrio, nos corpos de prova dos experimentos. Com esses resultados este presente trabalho conclui que do ponto de vista ambiental e de economia de recursos naturais, a substituição de parte dos agregados naturais por lixo eletrônico, e de 20% do cimento *Portland* por cinza volante, são razoáveis e significativas. Entre os objetivos deste presente trabalho não estão o de minimizar o custo da produção do concreto e nem melhorar a resistência à compressão do concreto. Os objetivos deste presente trabalho são mitigar os problemas causados ao meio ambiente pela destinação inadequada dos resíduos eletrônicos e diminuir a geração de gases que causam o efeito estufa, pela indústria da construção civil. Como trabalhos futuros, este presente trabalho pretende investigar a substituição de parte dos agregados naturais pela fração não metálica de PCI, com percentuais de substituição maiores do que as investigadas aqui. O motivo é que a

análise estatística indicou que uma maior porcentagem dessa substituição pode melhorar as resistências obtidas neste presente trabalho.

**Palavras-Chave:** sustentabilidade, resíduos, lixo eletrônico, concreto, agregado, lixiviação

## **Abstract**

Among the main concerns with environmental issues, this present work highlights two. The first is with the residue of the non-metallic fraction of the printed circuit board (PCB). This residue, despite having one of the highest rates of increase in its generation, arouses little interest from recyclers. The second issue is the concrete production process. Not only because it uses many natural resources, but because the Portland cement manufacturing process is responsible for generating a large part of greenhouse gases. In a survey carried out by this present work, no research was identified that investigated the replacement of part of the natural aggregates by the non-metallic fraction of PCB in the production of concrete. Therefore, this present work investigated the use of replacing part of the natural aggregates by the non-metallic fraction of PCB in the production of concrete. The replacement of part of the Portland cement with fly ash was also investigated. To carry out these investigations, a literature review was carried out to identify the types of waste that were being used as aggregates in the production of concrete and, also, to identify the percentages of replacement of Portland cement by fly ash. The data obtained in the literature review helped in the experimental design. The design was carried out using the mixing experiment methodology and the extreme vertex method. With this design, concrete traces were produced to investigate the percentage of replacement of natural aggregates by electronic waste, which produces concrete that is classified as structural concrete. This investigation was carried out for mixes that used the replacement of part of Portland cement by fly ash and for mixes that did not use this substitution. To carry out this investigation, slump and compressive strength tests of concrete were carried out. With the data from the experiment, a hypothesis test was performed (t test for two samples). The objective of this test is to compare the average compressive strength of the specimens whose traces replaced 20% of Portland cement with fly ash with the specimens whose traces did not perform this replacement. The result showed that there is no statistically significant difference between the two means. Another result of the experiments was the development of a mix using 20% fly ash as a substitute for Portland cement and part of the aggregates for e-waste, with a strength of 23.010 MPa. Four traces were also developed, without fly ash and with electronic waste, whose specimens obtained a concrete compressive strength of 21.804 MPa; 23.329 MPa; 23.614 MPa and 24.637 MPa. In this way, these five traits produced structural concrete, since their strengths are greater than or equal to 20 MPa. Finally, leaching tests were carried out. For leaching, a scanning electron microscopy was performed on the samples, conductivity and pH test in the water where the samples were soaked, in the periods of 24, 72, 168 and 384 hours. The result of the leaching showed that there was no chemical element in the specimens of the experiments that were different from the chemical elements found in the control traces. It also showed that there were no toxic elements, such as lead and mercury, in the specimens of the experiments. With these results, this present work concludes that from an environmental and natural resource saving point of view, the replacement of part of the natural aggregates by electronic waste, and of 20% of Portland cement by fly ash, are reasonable and significant. Among the objectives of this present work are not to minimize the cost of concrete production nor to improve the compressive strength of concrete. The objectives of this present work are to mitigate the problems caused to the environment by the inadequate destination of electronic waste and to reduce the generation of gases that cause the greenhouse effect, by the construction industry. As future works, this present work intends to investigate the replacement of part of the natural aggregates by the non-metallic fraction of PCI, with replacement percentages higher than those investigated here. The reason is that the statistical analysis indicated that a higher percentage of this replacement can improve the strengths obtained in this present work.

**Keywords:** sustainability, residue, e-waste, concrete, aggregate, leaching

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Compreensão do DS pela maior parte dos <i>players</i> envolvidos nos processos decisórios -----	25
Figura 1.2	Sumário da metodologia e das etapas utilizadas na análise bibliométrica	31
Figura 1.3	Distribuição, por ano de publicação, dos artigos pesquisados na base <i>Scopus</i> -----	32
Figura 1.4	Os 20 países que mais publicaram artigos com as palavras <i>aggregate</i> , <i>residue</i> e <i>concrete</i> no título ou palavras-chave ou no resumo -----	32
Figura 1.5	Artigos encontrados na base de dados Scopus por área temática -----	33
Figura 1.6	Distribuição, por país, dos 99 artigos das áreas de Ciências Ambientais, contendo as palavras <i>aggregate</i> , <i>residue</i> e <i>concrete</i> no título ou nas palavras-chave ou no resumo (a) e a evolução do número de publicações (b) -----	34
Figura 1.7	Resumo das principais informações obtidas na base Scopus de artigos com as palavras <i>aggregate</i> , <i>residue</i> e <i>concrete</i> no título, resumo ou palavras-chave -----	34
Figura 1.8	Evolução do número de publicações de artigos com autores brasileiros com as palavras <i>aggregates</i> , <i>residue</i> e <i>concrete</i> no título ou nas palavras-chave ou no resumo -----	35
Figura 1.9	Distribuição, por área, dos artigos brasileiros contendo as palavras <i>aggregate</i> , <i>residue</i> e <i>concrete</i> no título ou nas palavras-chave ou no resumo, na base Scopus -----	35
Figura 1.10	Distribuição anual de artigos com autores brasileiros de área de Ciência Ambiental na base de dados Scopus -----	36
Figura 1.11	Resumo das principais informações obtidas na base Scopus de artigos de autores brasileiros com as palavras <i>aggregate</i> , <i>residue</i> e <i>concrete</i> no título, resumo ou palavras-chave -----	36
Figura 1.12	Artigos com as palavras <i>aggregate</i> , <i>residue</i> e <i>concrete</i> no título ou palavras-chave ou resumo da base de dados <i>Web of Sciences</i> -----	37
Figura 1.13	Distribuição, por área, dos artigos com as palavras <i>aggregate</i> , <i>residue</i> e <i>concrete</i> no título ou palavras-chave ou no resumo da base de dados <i>Web of Sciences</i> -----	37
Figura 1.14	Distribuição, por país, dos 401 artigos contendo as palavras <i>aggregate</i> , <i>residue</i> e <i>concrete</i> no título ou nas palavras-chave ou no resumo -----	38
Figura 1.15	Distribuição, por ano de publicação, dos artigos das áreas de Ciências Ecológicas e Ambiental, na base de dados <i>Web of Science</i> -----	38
Figura 1.16	Os 230 artigos da área de Ciências Ambientais e Ecológicas, contendo as palavras <i>aggregate</i> , <i>residue</i> e <i>concrete</i> no título ou nas palavras-chave ou no resumo na base <i>Web of Sciences</i> -----	39
Figura 1.17	Resumo das principais informações obtidas na base <i>Web of Sciences</i> de artigos com as palavras <i>aggregate</i> , <i>residue</i> e <i>concrete</i> no título, resumo ou palavras-chave -----	39
Figura 1.18	Distribuição, por área, dos artigos brasileiros na base de dados <i>Web of Sciences</i> -----	40

Figura 1.19	Distribuição, por ano de publicação, dos artigos com autores brasileiros, na base de dados <i>Web of Sciences</i> -----	40
Figura 1.20	Distribuição, por ano de publicação, dos artigos brasileiros nas áreas de Ciências Ecológicas e Ambiental na base de dados <i>Web of Sciences</i> -----	41
Figura 1.21	Resumo das principais informações obtidas na base <i>Web of Sciences</i> de artigos com autores brasileiros com as palavras <i>aggregate, residue e concrete</i> no título, resumo ou palavras-chave -----	41
Figura 1.22	Ocorrência das palavras <i>aggregate, residue e concrete</i> no título de artigos com autores brasileiros da área de meio ambiente -----	56
Figura 1.23	Ocorrência das palavras <i>aggregate, residue e concrete</i> no resumo de artigos de autores brasileiros da área ambiental -----	57
Figura 1.24	Ocorrência das palavras <i>aggregate, residue e concrete</i> nas palavras-chave de artigos com autores brasileiros da área ambiental -----	57
Figura 1.25	Tipos de resíduos utilizados como substitutos de agregados naturais na construção civil	58
Figura 1.26	Esquemática da problemática e propostas deste presente trabalho ---	62
Figura 2.1	Evolução da quantidade de publicações, com a palavra “ <i>e-waste</i> ” no título na base <i>Web of Science</i> . Os dados de 2020 são referentes até o dia 23 de julho de 2020 -----	65
Figura 2.2	Evolução da quantidade de publicações, com a palavra “ <i>e-waste</i> ” no título na base <i>Scopus</i> . Os dados de 2020 são referentes até o dia 23 de julho de 2020. -----	66
Figura 2.3	Quantidade de publicações, com a palavra “ <i>e-waste</i> ” no título, na base <i>Web of Science</i> , dos vinte e cinco países que mais publicaram. Os dados de 2020 são referentes até o dia 23 de julho de 2020 -----	67
Figura 2.4	Quantidade de publicações, com a palavra “ <i>e-waste</i> ” no título na base <i>Scopus</i> , dos trinta países que mais publicaram. Os dados são referentes até o dia 23 de julho de 2020 -----	67
Figura 2.5	Distribuição, por metodologia de pesquisa, dos 60 artigos analisados neste presente trabalho -----	72
Figura 2.6	Produção, per capita, de WEEE pelos países pertencentes ao grupo Brasil, Rússia, Índia, África do Sul e China -----	75
Figura 2.7	Produção de computadores no Brasil -----	76
Figura 2.8	Evolução do PIB brasileiro de 2000 a 2015 -----	77
Figura 2.9	Evolução da produção de computadores e PIB brasileiros -----	78

Figura 2.10	Espaço <i>Simplex</i> do rendimento de um automóvel utilizando uma mistura de dois tipos de combustíveis A e B. A parte linear mostra a expectativa e a não linear mostra os valores observados -----	83
Figura 2.11	Região <i>simplex</i> para um experimento com três componentes. Todos os pontos, que representam as proporções dos componentes, estão contidos no triângulo, cuja equação é $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ -----	83
Figura 2.12	Sistema de coordenada simples para três componentes -----	84
Figura 2.13	Tetraedro representando um sistema de coordenadas <i>simplex</i> para uma mistura com quatro componentes -----	84
Figura 2.14	<i>Simplex-lattice</i> {3, 2} -----	86
Figura 2.15	Coordenadas triangulares ( $x_1, x_2, x_3$ ) -----	88
Figura 2.16	Superfície plana acima dos três componentes, formando uma superfície triangular. A superfície é expressa como $\eta = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3$ , onde, nesse caso, $\beta_2 > \beta_3 > \beta_1$ -----	87
Figura 2.17	Nomenclatura para as respostas nos pontos do <i>simplex-lattice</i> {3, 2} e <i>simplex-lattice</i> {3, 3} -----	90
Figura 2.18	Ilustração da superfície de resposta para três componentes -----	91
Figura 2.19	<i>Design simplex-centroide</i> para três componentes -----	96
Figura 2.20	Espaço experimental para um experimento com misturas, com três componentes, todos eles com restrições em seus limites superiores e inferiores -----	100
Figura 3.1	<i>E-waste</i> coletado pelos alunos participantes da gincana do IFSULDEMINAS -----	102
Figura 3.2	Transporte do <i>e-waste</i> do IFSULDEMINAS para o laboratório da Lorene Importação e Exportação Ltda -----	102
Figura 3.3	Trituradores utilizados para triturar o <i>e-waste</i> (a) e (b) e o material já triturado (c) -----	103
Figura 3.4	Componentes separados conforme a especificação (a) e os componentes sendo processados na betoneira (c) -----	104
Figura 3.5	Medição do <i>slump</i> do concreto utilizado para confeccionar os corpos de prova -----	104
Figura 3.6	Corpos de prova confeccionados com misturas contendo (da esquerda para a direita) 100%, 50%, 7,5% e 0% de <i>e-waste</i> -----	105

Figura 3.7	WAW – 1000 C <i>Computer Controlled Electro-Hydraulic Servo Universal Testing Machine</i> (a); <i>Universal Testing Machine</i> (b) -----	105
Figura 3.8	Placas de circuito impresso trituradas (a) e parte não metálica separada da parte metálica já triturada e transformada em pó -----	107
Figura 3.9	<i>Design simplex</i> do planejamento experimental -----	110
Figura 3.10	Teste de <i>slump</i> para o traço 06 sem substituir o cimento <i>Portland</i> por cinzas volantes -----	111
Figura 3.11	Amostras de concreto preparadas para ensaio de MEV -----	111
Figura 3.12	Estufa contendo as amostras de concreto cuja resistência o classifica como concreto estrutural -----	112
Figura 3.13	Preparo, com banho de ouro, das amostras de concreto para a realização da MEV -----	112
Figura 3.14	Equipamento utilizado para a realização da MEV (à esquerda) e equipamento utilizado para analisar os resultados da MEV (à direita) --	112
Figura 3.15	Preparação das amostras de concreto cujas resistências o classifica como concreto estrutural para ensaios de lixiviação -----	113
Figura 3.16	Equipamentos utilizados para medir o pH da água das amostras do concreto cujas resistência o classifica como concreto estrutural -----	114
Figura 3.17	Equipamento utilizado para medir a condutividade elétrica na água coletada das amostras de concreto -----	114
Figura 4.1	Gráfico mostrando a resistência das amostras de concreto utilizando <i>e-waste</i> como parte dos agregados -----	117
Figura 4.2	Resistência à compressão dos corpos de prova dos experimentos utilizando a substituição de 20% do cimento <i>Portland</i> por cinza volante e sem a substituição -----	119
Figura 4.3	FCK para corpos de prova com 28 dias de cura ordenados por quantidade, crescente, de substituição de parte dos agregados naturais pela FNM -----	120
Figura 4.4	Análise do experimento, para corpos de prova com 28 dias de cura, realizada por meio do software Minitab -----	121
Figura 4.5	Sumário do modelo para amostras com (de cima para baixo): 7, 14 e 28 dias de tempo de cura -----	121
Figura 4.6	Gráficos residuais para analisar projeto de mistura para amostras com 28 dias de tempo de cura. O gráfico (a) é o gráfico de probabilidade	

	normal de resíduos. O gráfico (b) é o gráfico de resíduos versus ordem. (c) é resíduos versus ajustes -----	122
	-	
Figura 4.7	Gráfico fornecendo informações sobre os efeitos dos componentes, em relação à mistura de referência, para os traços sem cinza volante (a) e com (b) -----	123
Figura 4.8	Gráfico de contorno com os dados dos resultados do FCK para traços sem cinza volante (a) e com (b) -----	124
Figura 4.9	Superfície de resposta usando os resultados de FCK para corpos com 28 dias de cura para os traços sem cinza volante (a) e com (b) -----	124
Figura 4.10	Resultado do teste de hipótese sobre o FCK médio dos corpos de prova, com 7 dias de cura, produzido com a substituição de 20% do cimento Portland por cinza volante, ser igual à média do FCK dos corpos de prova produzidos sem essa substituição -----	125
Figura 4.11	Resultado do teste de hipótese sobre o FCK médio dos corpos de prova, com 14 dias de cura, produzido com a substituição de 20% do cimento Portland por cinza volante, ser igual à média do FCK dos corpos de prova produzidos sem essa substituição -----	126
Figura 4.12	O resultado do teste de hipótese sobre o FCK médio dos corpos de prova, com 28 dias de cura, produzido com a substituição de 20% do cimento Portland por cinza volante, ser igual à média do FCK dos corpos de prova produzidos sem essa substituição -----	126
Figura 4.13	Resultaedo da MEV realizada na amostra do traço controle sem adição de cinza volante -----	127
Figura 4.14	Resultaedo da MEV realizada na amostra do traço controle com adição de cinza volante -----	128
Figura 4.15	Resultaedo da MEV realizada na amostra do traço 01 sem adição de cinza volante -----	129
Figura 4.16	Resultaedo da MEV realizada na amostra do traço 01 com adição de cinza volante -----	130
Figura 4.17	Resultaedo da MEV realizada na amostra do traço 02 sem adição de cinza volante -----	131
Figura 4.18	Resultaedo da MEV realizada na amostra do traço 03 sem adição de cinza volante -----	132
Figura 4.19	Resultaedo da MEV realizada na amostra do traço 03 com adição de cinza volante -----	133

Figura 4.20	Resultaedo da MEV realizada na amostra do traço 06 sem adição de cinza volante -----	134
Figura 4.21	Resultaedo da MEV realizada na amostra do traço 06 com adição de cinza volante -----	135
Figura 4.22	Resultaedo da MEV realizada na amostra do traço 10 sem adição de cinza volante -----	136

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1	Principais informações dos artigos com autores brasileiros -----	43
Quadro 2.1	Principais informações dos 60 artigos cujo título continha a palavra “ <i>e-waste</i> ” -	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Produção de computadores no Brasil -----	76
Tabela 2.2	Evolução do Produto Interno Bruto (PIB) no Brasil -----	77
Tabela 3.1	Traços utilizados no experimento preliminar -----	104
Tabela 3.2	Traço unitário para a mistura de controle -----	106
Tabela 3.3	Resultado dos testes de granulometria para amostras de <i>e-waste</i> -----	108
Tabela 3.4	Níveis para os fatores investigados neste trabalho -----	109
Tabela 3.5	Projeto experimental, usando experimento de mistura, vértices extremos (em kg) -----	110
Tabela 4.1	<i>Slump</i> das amostras dos corpos de prova -----	115
Tabela 4.2	Resultado do ensaio de resistência feito nos corpos de prova -----	116
Tabela 4.3	Resultado do teste de abatimento para experimentos com e sem a substituição de 20% do cimento <i>Portland</i> por cinzas volantes -----	117
Tabela 4.4	Resultados dos testes de resistência à compressão -----	118
Tabela 4.5	Elementos químicos identificados em cada traço -----	137
Tabela 4.6	Resultado do nível de pH nas águas coletadas das amostras -----	138
Tabela 4.7	Resultado do teste de condutividade elétrica nas águas coletadas das amostras -----	149

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACSP	<i>Association of Collegiate Schools of Planning</i>
AFM	Análise do Fluxo de Materiais
AP	Argamassas Poliméricas
ASR	Resíduo de Trituração Automotiva
BOF	Sigla em Inglês para Escória do Forno Básico de Oxigênio
BPs	Bifenilos Policlorados
BRICS	Conjunto formado pelos países Brasil, Rússia, Índia, China e África do S Sul
C&DW	Sigla em Inglês para Gestão de Resíduos de Construção e Demolição
CBC	Cinza de Bagaço da Cana-de-açúcar
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CLFS	Cinza de Lodo de Fossa Séptica
DDP/DFs)	Dibenzo-p-dioxinas Policloradas e Dibenzo-Furanos
DP	Desenvolvimento de Produtos
DPS	Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis
DS	Desenvolvimento Sustentável
EDPs	Éteres Difenílicos Polibromados
EEE	Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
EOL	Sigla em Inglês para Fim de Vida Útil
EUA	Estados Unidos da América
FCK	Sigla em Inglês para Resistência Característica à Compressão
FLT	Fração Leve Triturada
FMs	Frações Metálicas
FNMs	Frações Não Metálicas

IBES	Índice de Bem-Estar Econômico Sustentável
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFSULDEMINAS	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais
IPF	Índice Planeta Feliz
IPG	Indicador de Progresso Genuíno
LCA	Sigla para Avaliação do Ciclo de Vida em inglês
LFS	Ladle Furnace Slag
LR	Logística Reversa
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
ONU	Organização das Nações Unidas
PBDEs	<i>Polybrominated Diphenyl Ethers</i>
PC	Computador Pessoal
PCBs	<i>Polychlorinated Biphenyls</i>
PCI	Placas de Circuito Impresso
PIB	Produto Interno Bruto
PIBV	Produto Interno Bruto Verde
PNRS	Programa Nacional de Resíduos Sólidos
POHs	Poluentes Orgânicos Halogenados
RAP	Responsabilidade Ampliada do Produtor
RCBs	Retardadores de Chama Bromados
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
REEE	Resíduo de Equipamento Elétricos e Eletrônicos
REP	Responsabilidade Estendida do Produtor

RL	Revisão de Literatura
SCBA	Sigla em Inglês para Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
WCED	Sigla em inglês para Comissão Mundial para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento

# SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	22
1.1 O desenvolvimento sustentável e a problemática do lixo eletrônico .....	22
1.2 Justificativa e contribuições esperadas .....	26
1.3 Objetivo .....	29
1.4 Delimitação do trabalho .....	29
1.5 Estado da arte .....	30
1.5.1 Base Scopus .....	31
1.5.1.1 Dados sobre artigos com autores brasileiros .....	35
1.5.2 Base <i>Web of Science</i> .....	37
1.5.2.1 Dados sobre artigos com autores brasileiros .....	40
1.5.3 Análise dos artigos com autores brasileiros .....	42
1.5.4 Considerações no nível global .....	59
1.6 Estrutura do trabalho .....	61
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	63
2.1 <i>E-waste</i> ou Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos .....	63
2.1.1 Definição .....	63
2.1.2 Revisão de literatura sobre o <i>e-waste</i> .....	63
2.1.3 <i>E-waste</i> no Brasil .....	74
2.1.4 Fração não metálica da placa de circuito impresso .....	80
2.2 Superfície de resposta .....	81
2.2.1 Fundamentos .....	81
2.2.2 Experimento com misturas .....	82
2.2.3 <i>Design simplex-lattice</i> .....	85
2.2.3.1 Estimando os parâmetros nos polinômios $\{q, m\}$ .....	91
2.2.3.2 Propriedades dos estimadores das respostas $\hat{y}(x)$ .....	92
2.2.4 O <i>design simplex-centroide</i> .....	95
2.2.5 <i>Design</i> vértices extremos .....	98
CAPÍTULO 3 - MÉTODO DE PESQUISA .....	101
3.1 Planejamento Experimental .....	101
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	115
4.1 Experimento preliminar .....	115
4.2 Experimento principal .....	117

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES .....	140
REFERÊNCIAS .....	142

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 O desenvolvimento sustentável e a problemática do lixo eletrônico

Além dos problemas ambientais, também os esgotamentos de recursos minerais e energéticos num futuro previsível, forçam os produtores a implementarem dimensões da sustentabilidade ambiental no *design* de produtos (GO, WAHAB e HISHAMUDDIN, 2015), mostrando que a produção de produtos sustentáveis tem outras motivações, além das ambientais. Tanto produtores, como consumidores, já perceberam que os recursos naturais da Terra são finitos e, por isso, todos são instados a tomar medidas para minimizar os efeitos dessa limitação de recursos (CHANG, LEE e CHEN, 2014). Limitação essa que poderá privar a sociedade de vários produtos no futuro, diminuindo a condição de vida da mesma. Essa crescente conscientização sobre a sustentabilidade ambiental atingiu plenamente a realidade dos negócios, uma vez que consumidores e empresas passam a procurar alternativas para mitigar as demandas ambientais urgentes, resultantes dos crescimentos populacional e econômico contínuos (MEDEIROS, RIBEIRO e CORTIMIGLIA, 2014).

O crescente consumo dos recursos não renováveis pela civilização moderna, além de comprometer a disponibilidade desses recursos para as gerações futuras (MATTERA, LÓPEZ-PORTILLO e GAVA, 2020), já está causando danos significativos a qualidade de vida da geração atual. Danos como a constatação do risco de extinção de espécies. De acordo com a maior avaliação realizada na Terra até o momento, há o risco de extinção de um milhão de espécies de plantas e animais. E a consequência dessa extinção impacta negativamente a saúde das pessoas e a biodiversidade dos ecossistemas do nosso planeta (MCLAUGHLIN, 2021), resultando em danos para a humanidade, como a piora na qualidade do ar e, até mesmo, prejudicando a conservação de relíquias históricas da humanidade, pois fatores ambientais podem causar danos ao patrimônio cultural (MARCHETTI *et al.*, 2017). Dessa forma é urgente compreender que a vida humana depende de um mundo biodiverso. Depende de ecossistemas saudáveis e um número incontáveis de formas de vida que nos fornecem água doce, oxigênio, polinização, fertilidade e estabilidade do solo, alimentos e medicamentos (MCLAUGHLIN, 2021).

A percepção desses danos ao meio ambiente e a constatação de que o Desenvolvimento Sustentável (DS) é uma questão de sobrevivência para humanidade, fez que os consumidores passassem a exigir que as empresas adotassem processos sustentáveis para produzir seus

produtos (ADEYEYE, SHE e BAÏRI, 2017). Em consequência, algumas organizações modernas passaram a reconhecer que a sustentabilidade é um conceito importante para a sobrevivência no mundo competitivo. Essas organizações adotam práticas projetadas para manter a segurança do meio ambiente e minimizar a utilização de energia, reduzindo custos e evitando problemas ambientais, com o objetivo de manter a atmosfera limpa e verde (VINODH e TATHOD, 2010).

Essas medidas também proporcionam benefícios para as empresas que, ao integrarem a dimensão ambiental em seus produtos ou estratégia empresarial, são beneficiadas através de maior eficiência no uso de recursos, maior retorno sobre o investimento, aumento de vendas, desenvolvimento de novos mercados e melhor imagem corporativa (DANGELICO, PONTRANDOLFO e PUJARI, 2013). Desse modo, parte das empresas tratam dos aspectos ambientais, não mais como um fardo, mas como um valor agregado (HELD *et al.*, 2018). Por exemplo, uma empresa, ao investir em métodos de engenharia para maximizar ou melhorar a gestão do Fim de Vida Útil (EOL, em inglês) do produto, além de estar tratando de questões ambientais, também pode aumentar o lucro da empresa (HANDWERKER *et al.*, 2010), mostrando que, em muitos casos, quando os aspectos ambientais são integrados no Desenvolvimento de Produto (DP) leva a sinergias com outros interesses comerciais e, até mesmo, reduções de custo a curto prazo (BYGGETH e HOCHSCHORNER, 2006). Assim, a busca por níveis de desempenho ambientalmente sustentáveis é relevante não apenas para ambientalistas e ecologistas, mas também para cientistas e profissionais sociais, políticos, agentes econômicos e gerenciais (MEDEIROS, RIBEIRO e CORTIMIGLIA, 2014).

A exigência dos consumidores e as práticas das organizações modernas, valorizando a sustentabilidade evidenciam um aumento no comprometimento com o DS. Esse aumento no comprometimento com o DS pela comunidade mundial em geral, em parte, é reflexo também da atuação de organizações e acordos internacionais, como as convenções sobre biodiversidade e a Agenda 21, que adotam normas e valores, promovendo a sustentabilidade (BAILEY, 2014). Através dessas organizações e acordos, a comunidade mundial passa a perceber que a sustentabilidade de um país é cada vez mais dependente de outros países, como no caso da destinação de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), que hoje é um problema global (KISSINGER, REES e TIMMER, 2011).

A compreensão de que o DS é vital para a humanidade é verificada, tanto entre as pessoas, como pelos governos. Governos como os europeus que passaram a exigir que os novos produtos atendam requisitos ambientais, antes de serem aprovados e colocados no mercado. Essas atitudes produziram melhoras em alguns indicadores ambientais nas últimas décadas. No

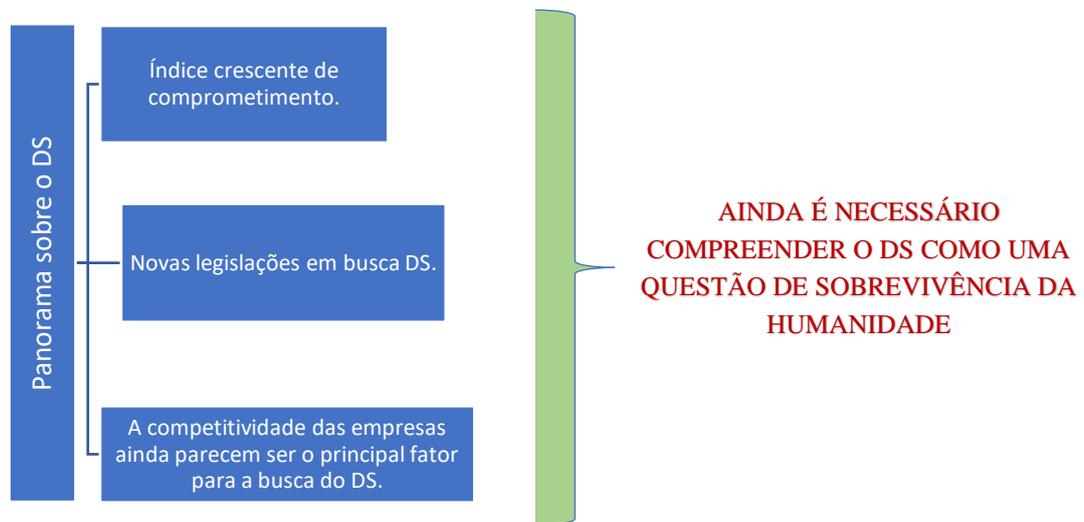
entanto, dados empíricos mostram que o aumento global no consumo de energia e matéria prima pressionam o meio ambiente (ASKHAM, GADE e HANSSEN, 2012). Essa pressão se dá, principalmente, pelo aumento exponencial de exploração de recursos naturais observados nas últimas décadas (GÓMEZ-BAGGETHUN e NAREDO, 2015). Essa alta significativa na exploração de recursos naturais, fez com que houvesse a percepção de que o DS é uma necessidade urgente. É urgente principalmente porque já está constatado que as atividades socioeconômicas, que consomem recursos e energia em grande escala, e os princípios de mercado de produção e consumo em massa, estão se aproximando do fim (SAKAI, 2011), exigindo que os processos de produção sejam sustentáveis. Para isso o mercado e a sociedade em geral precisam compreender a necessidade de investir recursos financeiros para a implantação de processos sustentáveis pois, assim como em qualquer medida voltada para a melhoria social e o bem estar da população em geral, as medidas de sustentabilidade ambiental também geram custos financeiros, necessitando de financiamento novo (DELAHUNT, 2005). Dessa forma, independente da condição do país, se rico ou pobre, todos devem se comprometer com a preservação do meio ambiente pois, caso contrário, não só o meio ambiente estará comprometido, mas também o próprio desenvolvimento econômico. Dito de outra forma, todos devem ter em mente que não existe desenvolvimento econômico sustentável sem considerar, fortemente, as questões ambientais envolvidas nos processos econômicos (HARIEMBRUNDTLAND, 1985).

Para obter um processo sustentável as empresas devem redesenhar seus produtos e seus processos produtivos, incorporando materiais reciclados, reutilizando outros, reduzindo suas emissões de CO<sub>2</sub> e melhorando o uso de energias renováveis (MATTERA, LÓPEZ-PORTILLO e GAVA, 2020). Dessa forma, os processos de desenvolvimento de produtos devem ser modificados ao incorporar novas técnicas no desenvolvimento de produtos, como as já populares, Avaliação do Ciclo de Vida (LCA, em inglês) e a Análise do Fluxo de Materiais (AFM), com o objetivo de quantificar variáveis ambientais críticas. Para atingir este objetivo estas técnicas buscam avaliar cientificamente o impacto ambiental e o consumo de recursos (ALMEIDA *et al.*, 2010). Essas novas técnicas, além de contribuir para o DS, também contribuem para a rentabilidade dos investimentos, uma vez que tem como consequências a redução de consumo de energia, aumento de produtividade e redução de resíduos (ADWUNMI, OMIRIN e KILEOSO, 2012).

Dito de outra forma, apesar do lucro ser uma variável significativa para um sistema de produção sustentável, as empresas não devem negligenciar a necessidade da preservação do meio ambiente. A sociedade, como um todo, está compreendendo que a chave para alcançar o

desenvolvimento sustentável é criar um vínculo sólido entre pessoas, lucro e planeta. Vínculo esse que é denominado como estrutura *Triple Bottom Line* – TBL (MATTERA, LÓPEZ-PORTILLO e GAVA, 2020).

A necessidade de entender que o DS é vital para a continuidade do modo de vida e de bem-estar da humanidade começa a se refletir nos meios políticos e acadêmicos. Já existem vários trabalhos mostrando a necessidade de incluir questões ambientais nos indicadores usados para avaliar o nível de sucesso de um país. Desta forma, novos indicadores alternativos, ou complementares, ao Produto Interno Bruto (PIB) são propostos. Entre esses indicadores, este presente trabalho destaca o Indicador de Progresso Genuíno (IPG), Produto Interno Bruto Verde (PIBV), Índice de Bem-Estar Econômico Sustentável (IBES) e o Índice Planeta Feliz (IPF) (CHEN *et al.*, 2017). Apesar de todas essas iniciativas, a grande maioria dos *players* envolvidos nos processos decisórios ainda não perceberam a verdadeira necessidade de implementar o DS (Figura 1.1).



**Figura 1.1:** Compreensão do DS pela maior parte dos *players* envolvidos nos processos decisórios

Além do aumento do consumo de recursos naturais, a geração de resíduos também é um dos principais fatores negativos para um desenvolvimento sustentável. Dessa forma, dar um destino adequado para os resíduos gerados por produtos pós uso faz parte da agenda política, social e econômica global. Por isso, apesar de sua grande importância, por ser uma indústria de alta tecnologia e que mais agrega valor aos seus produtos (COELHO, RESENDE e FERNANDES, 2013; LI, ZENG e STEVELS, 2015), há uma preocupação crescente em todo mundo com a destinação correta dos resíduos gerados pelos produtos da indústria de eletro e eletrônicos (LU *et al.*, 2015). O motivo dessa crescente preocupação com esse tipo de resíduo

é que, além desse resíduo conter uma variedade de substâncias tóxicas que podem contaminar o meio ambiente e ameaçar a saúde humana (KUMAR, HOLUSZKO E ESPINOSA, 2017<sup>a</sup>; KIDDEE, NAIDU e WONG, 2013), o incremento na geração desse resíduo é o maior entre todos os outros tipos de resíduos no mundo (CAYUMIL *et al.*, 2014).

## 1.2 Justificativas e contribuições esperadas

No Brasil foi regulamentada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2010. Essa legislação tem como objetivo regular a destinação de resíduos pós consumo. Em relação ao lixo eletrônico, a PNRS procurou implantar a Logística Reversa (LR). No entanto, ainda há várias barreiras para que a LR de equipamentos que geram o lixo eletrônico seja efetivamente aplicada, devido a barreiras como a coleta de lixo eletrônico por coletores informais e o descumprimento da legislação por uma grande quantidade de empresas. Em consequência de práticas como essas, a gestão do lixo eletrônico é um desafio no Brasil, onde a taxa de coleta deste tipo de resíduo é de apenas 2% (AZEVEDO *et al.*, 2017). Em se tratando de lixo eletrônico, este presente trabalho identificou que o resíduo composto da fração não metálica das placas de circuitos impressos (FNMs) apresentam uma das maiores taxas de geração em todo o mundo, além de ter um processo de destinação final muito complexo (LUHAR e LUHAR, 2019).

Além das preocupações com o resíduo da fração não metálica das placas de circuito impresso (FNMs), outro ramo industrial que desperta uma grande preocupação na comunidade mundial é a indústria da construção civil. Não é possível desconsiderar o grande peso que esta indústria tem na economia brasileira (WILLIAM *et al.*, 2013), sendo responsável por 14% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro em 2014 (PAZ, *da et al.*, 2014). Além disso, é geradora de grande parte de empregos para a população mais desfavorecida (SANTANA E OLIVEIRA, 2004). Mas, a indústria da construção civil também impacta negativamente o meio ambiente. O principal motivo desse impacto negativo causado ao meio ambiente está no fato da indústria da construção civil ser uma grande consumidora de recursos naturais, sendo que de 20% a 50% do total desses recursos são consumidos pela sociedade (PAZ, *DA et al.*, 2014) e, por isso, as preocupações com a sustentabilidade tem ocupado cada vez mais espaço nessa indústria (SAIEG *et al.*, 2018).

Outra grande preocupação da comunidade mundial que este presente trabalho identificou foi com os efeitos causados pelo processo de fabricação do cimento *Portland*. Esse produto está entre os materiais mais importantes para a construção de projetos industriais de

grande escala, como petroquímicos, refinarias, pontes, barragens, sistemas de esgoto e reservatórios de reatores (BAHRANIFARD, *et al.*, 2019). Além disso, o rápido crescimento populacional e a deterioração da infraestrutura levaram a humanidade a uma demanda urgente de rápida expansão na indústria da construção (TOUFIGH e JAFARI, 2021). Em consequência dessa demanda, o cimento *Portland*, que é o ligante mais utilizado para a produção de concreto (NUAKLONG, SATA e CHINDAPRASIRT, 2016), tem uma taxa de fabricação crescente, uma vez que o concreto é o material mais utilizado pela indústria da construção civil (AMRAN, DEBBARMA E OZBAKKALOGLU, 2021).

Essa alta tendência no uso do concreto em todo o mundo tem causado um crescente impacto ambiental (KANTARCI, TÜRKMEN e EKINCI, 2021), não só porque o concreto utiliza uma quantidade significativa de recursos naturais, mas porque o processo de fabricação do cimento *Portland* resulta em uma grande emissão de dióxido de carbono CO<sub>2</sub>. Esse processo é responsável por taxas de emissão que são estimadas em 5% a 7% ao ano de todo CO<sub>2</sub> gerado no mundo (TOUFIGH e JAFARI, 2021). Dessa forma o processo de fabricação de cimento *Portland* é responsável pela segunda maior fonte poluição (KANTARCI, TÜRKMEN e EKINCI, 2021). Assim, uma consequência da crescente preocupação com o aquecimento global, é a busca por ligantes alternativos ao cimento *Portland* (LI *et al.*, 2021), uma vez que seu processo de fabricação é também o principal responsável pelas emissões de gases de efeito estufa (AMRAN, DEBBARMA E OZBAKKALOGLU, 2021).

Uma das soluções para mitigar a preocupação global com a geração de CO<sub>2</sub> pelo processo de fabricação do cimento *Portland* pode ser a utilização de materiais cimentícios complementares em substituição ao cimento (AREZOUMANDI E VOLZ, 2013). Essa substituição pode produzir concretos sustentáveis e mais verdes e são de grande interesse para a indústria de construção global (AMRAN, DEBBARMA E OZBAKKALOGLU, 2021). Também interessam a toda a sociedade, pois a redução do consumo de cimento *Portland* leva à redução da emissão de CO<sub>2</sub> o que pode diminuir a aceleração das mudanças climáticas (TOUFIGH e JAFARI, 2021). Assim, a utilização de materiais complementares para substituição parcial do cimento *Portland* deve ser investigada, com o objetivo de reduzir o consumo de cimento e, conseqüentemente, a emissão de CO<sub>2</sub> (NUAKLONG, SATA e CHINDAPRASIRT, 2016). Além do benefício ambiental, a utilização de resíduos para substituir parte do cimento *Portland* torna o concreto mais econômico e, em muitos casos, mais durável (AREZOUMANDI E VOLZ, 2013).

Diante do que foi exposto até aqui, este presente trabalho entende que há, tanto uma preocupação com a utilização de recursos naturais pela indústria da construção civil, como com

a destinação dos resíduos da fração não metálica da Placa de Circuito Impresso (PCI). Essa preocupação com a fração não metálica de PCI se dá por que esse tipo de resíduo apresenta uma das maiores taxas de geração entre todos os outros tipos de resíduo em todo mundo, aliada à complexidade do processo de sua destinação correta (LUHAR e LUHAR, 2019). Baseado nesse entendimento, este presente trabalho investigou a substituição de parte dos agregados naturais pela fração não metálica de PCI e de parte do cimento *Portland* por cinza volante.

Para decidir investigar o uso de FNMs como substituto de parte dos agregados naturais na produção de concreto, este presente trabalho realizou uma revisão da literatura. O objetivo foi verificar quais aplicações estavam sendo investigadas para FNMs. Desta revisão, destacou-se que a maioria dos pesquisadores investiga a utilização da FNMs como cargas para resinas termofixas e resinas termoplásticas ao considerar métodos de reciclagem física (MARQUES, MARRERO E MALFATTI, 2013). Outras aplicações identificadas são: o uso da parte não metálica do lixo eletrônico (e não das FNMs) como substituto do agregado graúdo na produção de concreto (MANATKAR e DESHMUKH, 2015); a utilização de lixo eletrônico completo, sem separação de partes metálicas e não metálicas, como um agregado fino na produção de concreto (DAMAL, LONDHE E MANE, 2015); sucata de computadores pessoais como agregado para a produção de concreto (GÓMEZ *et al.*, 2020); poliestireno de alto impacto, uma parte da fração de plástico do lixo eletrônico (não apenas de PCIs) como um agregado grosso na produção de concreto (SENTHIL KUMAR e BASKAR, 2015); SENTHIL KUMAR *et al.*, 2018); resíduos de pilhas de zinco-carvão como aditivo em argamassas e concreto (COIMBRA, LIBARDI e MORELLI, 2004) e-fibre, uma parte da fração não metálica do lixo eletrônico (não apenas de PCI) como agregado em concreto (NAGAJOTHI e FELIXKALA, 2014); pedaços de 25 mm de lixo eletrônico como agregado grosso na produção de concreto (RAJPUT, GUPTA e HI, 2019); e resíduo de fibra óptica de polímero como agregado no concreto (SUCHORAB, FRANUS e BARNAT-HUNEK, 2020).

Dessa forma, o autor deste presente trabalho pretende utilizar seus conhecimentos, adquiridos no seu curso de mestrado, para contribuir na mitigação dos danos causados ao meio ambiente. O autor é mestre em Ciências em Materiais para Engenharia. Portanto, uma das principais bases de seu conhecimento é o estudo de novos materiais. Assim, utilizando sua formação como Mestre em Ciências em Materiais para Engenharia, o conhecimento adquirido no programa de Doutorado em Engenharia de Produção e as informações obtidas na revisão realizada por este trabalho, pretende-se proporcionar as seguintes contribuições:

- Propor uma destinação segura, que não gere passivo ambiental, para o lixo eletrônico, cujo volume aumenta a cada dia, sendo o Brasil o maior gerador de lixo eletrônico na América

do Sul (FORTI *et al.*, 2020). Principalmente para a FNMs, que é a fração do lixo eletrônico que desperta a menor atenção, por seu baixo valor comercial e por seu processo de reciclagem ser muito complexo.

- Contribuir para que construção civil seja mais sustentável, visto que a substituição da matéria-prima natural por material reciclado é uma das formas mais eficientes para esse fim (CAETANO, SCHALCH E PABLOS, 2020).

### **1.3 Objetivo**

Este presente trabalho tem como objetivo geral analisar a substituição de parte dos agregados naturais pela FNM na produção de concreto estrutural. Também faz parte do escopo deste presente trabalho investigar a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. O presente trabalho considera que essas substituições são inéditas, visto que as pesquisas nas bases de conhecimento realizadas não identificaram nenhuma outra pesquisa publicada com uma proposta semelhante.

O objetivo geral se desdobra nos seguintes objetivos específicos:

- Apresentar um panorama da participação do Brasil nas pesquisas envolvendo a Engenharia Civil e o Meio Ambiente;

- Identificar quais são os principais resíduos que estão sendo investigados para serem utilizados como substitutos de parte dos agregados naturais na produção de concreto, principalmente, pelos pesquisadores brasileiros;

- Verificar a hipótese de que a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante na produção do concreto produz um concreto que não tenha uma diferença, estatisticamente significativa, na sua resistência à compressão;

- Identificar as porcentagens de substituição de agregado natural pela FNMs na produção de concreto que produz um concreto que seja classificado como estrutural; e

- Verificar as hipóteses de que as substituições do cimento *Portland* por cinza volante e de parte do agregado natural pela FNMs, produzam um concreto que seja classificado como estrutural.

### **1.4 Delimitação do trabalho**

Este presente trabalho delimita-se a desenvolver traços de concreto, utilizando os resíduos FNMs e cinza volante como parte de sua matéria prima, que seja classificado como concreto estrutural. Não é objetivo deste presente trabalho melhorar as propriedades do

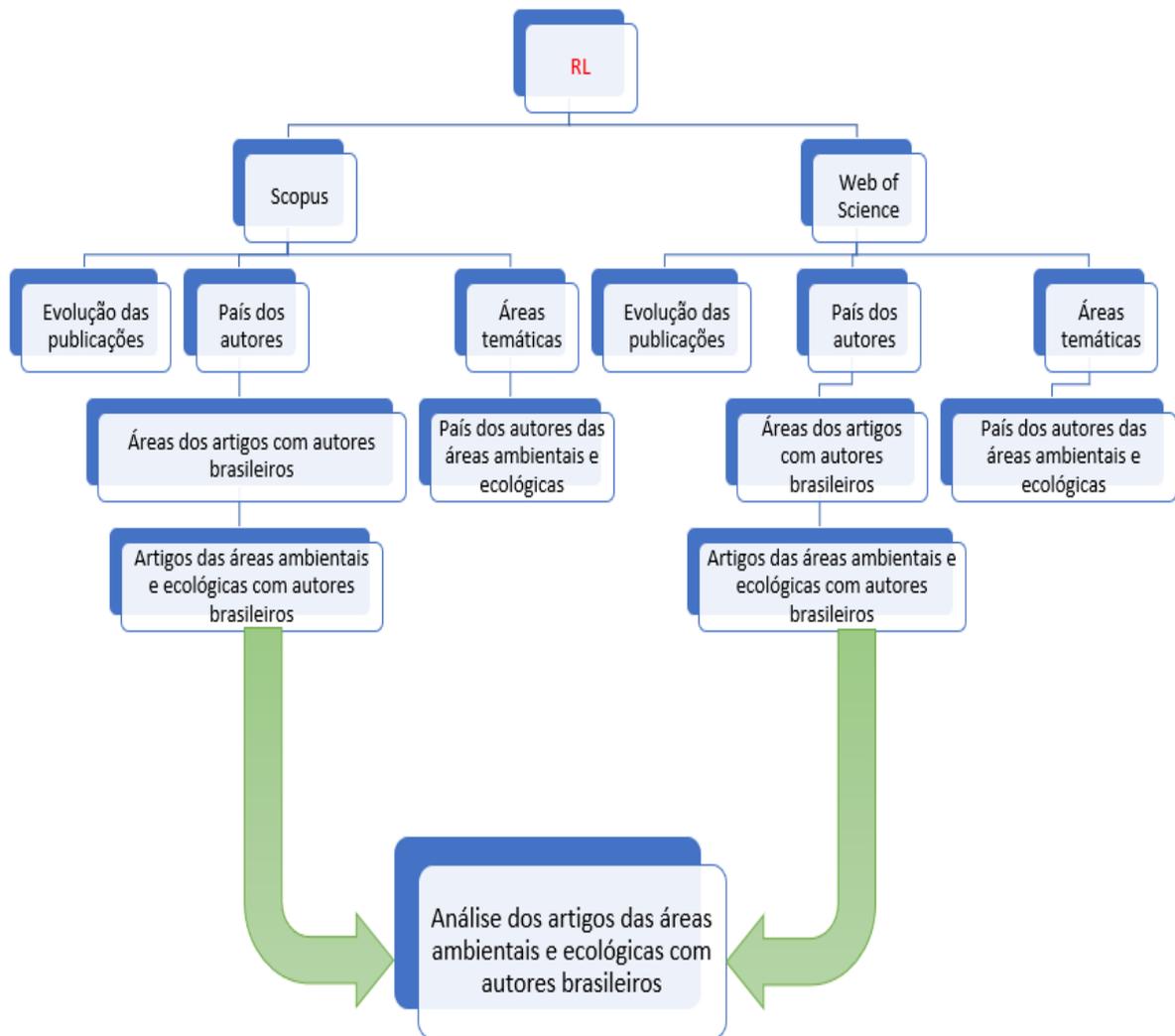
concreto ou minimizar o custo de produção do mesmo, ao utilizar esses resíduos. O objetivo é destinar de forma ambientalmente correta tais resíduos e contribuir para a diminuição da geração dos gases que causam o efeito estufa.

## 1.5 Estado da arte

Para verificar o estado da arte da utilização de resíduos na produção de concreto, foi realizada uma análise bibliométrica. Nessa análise foram pesquisados artigos que continham as palavras *aggregates*, *residue* e *concrete*, no título, ou no resumo ou nas palavras-chave. Essa análise foi realizada nas bases *Web of Science* e *Scopus*, que são consideradas as duas maiores bases de dados científicas disponíveis (ALRABGHI e TIWARI, 2015). Os objetivos da análise foram:

- Verificar como o Brasil se insere no contexto mundial, em relação à pesquisa envolvendo a Engenharia Civil e as questões de Meio Ambiente;
- Identificar as áreas dos artigos com as características investigadas nessa análise;
- Identificar os principais resíduos que estão sendo investigados pelos pesquisadores brasileiros;
- Verificar a hipótese de que uma busca por artigos, com as características da análise feita por este trabalho, retornará artigos que, na maioria, serão relacionados ao meio ambiente e engenharia civil.

A Figura 1.2 sumariza a metodologia e as etapas da análise bibliométrica para atender os objetivos acima. Como pode ser visto na Figura 1.2, usando os dados dos artigos, foi realizada uma análise quantitativa. O resultado dessa análise produziu gráficos com as seguintes informações: ano de publicação dos artigos; país de origem dos autores (todas as áreas temáticas); país de origem dos autores dos artigos ligados às áreas ambientais e ecológicas; áreas temáticas em que os artigos pertencem (global); e, por último, áreas temáticas em que os artigos, com autores brasileiros, pertencem.

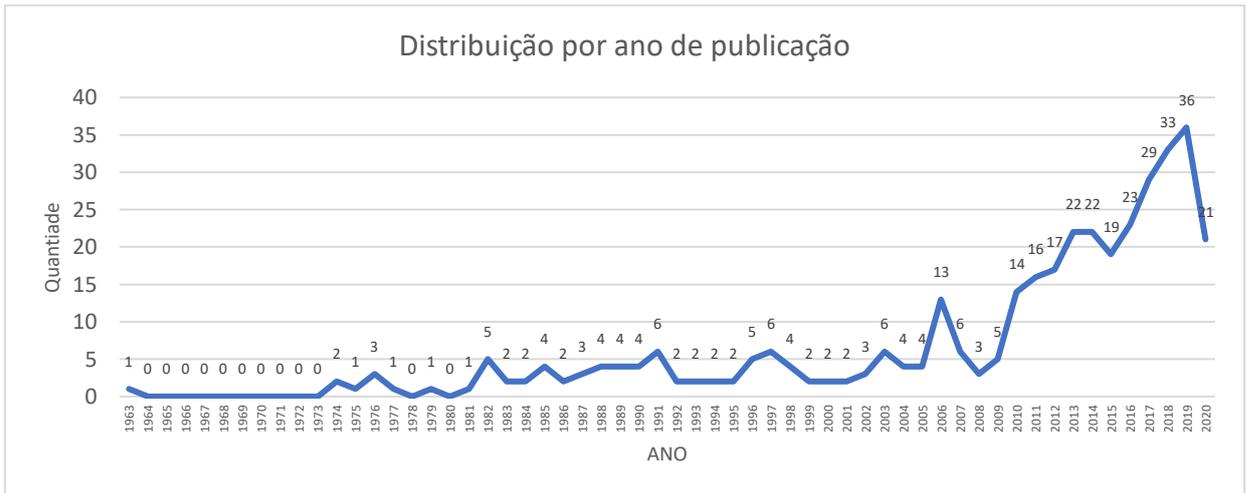


**Figura 1.2:** Sumário da metodologia e das etapas utilizadas na análise bibliométrica

Um dos resultados da análise quantitativa foi a identificação dos artigos, com autores brasileiros, das áreas ambientais e ecológicas. Assim, o próximo passo foi realizar uma análise qualitativa desses artigos. A principal informação obtida nessa análise foi a identificação dos principais resíduos que estão sendo investigados pelos pesquisadores brasileiros. Essas informações subsidiaram este presente trabalho na escolha do resíduo a ser utilizado como substituto de parte da matéria prima na indústria da construção civil.

### 1.5.1 Base Scopus

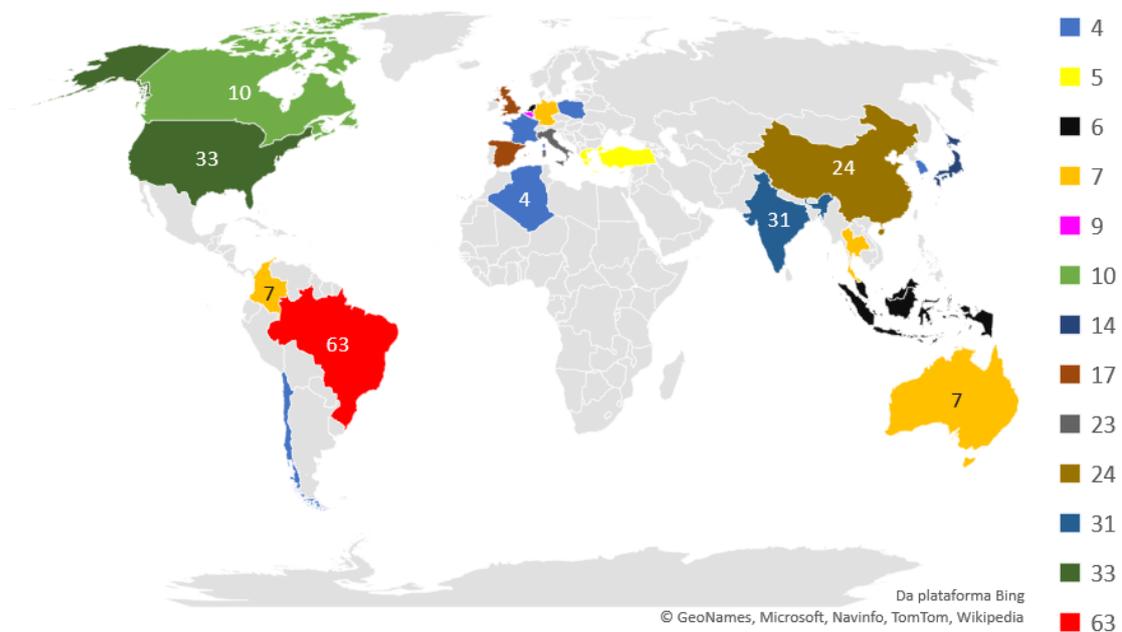
Na base de dados *Scopus*, foram identificados 371 artigos contendo as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou nas palavras-chave ou no resumo. A Figura 1.3 mostra a distribuição, por ano de publicação, desses artigos.



**Figura 1.3:** Distribuição, por ano de publicação, dos artigos pesquisados na base *Scopus*

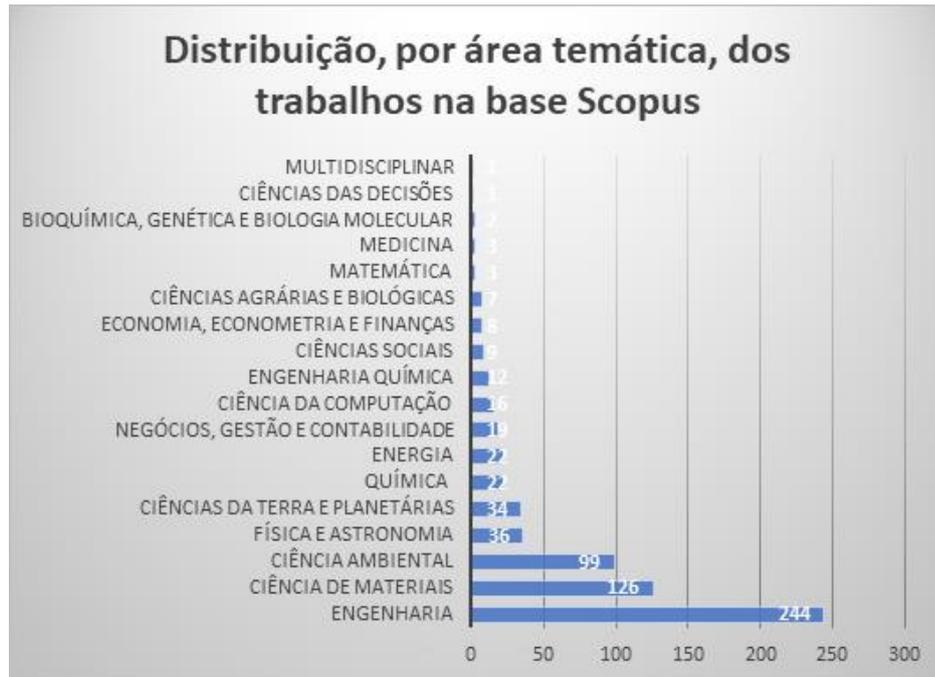
A Figura 1.4 mostra os 20 países que mais publicaram artigos com as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou nas palavras-chave ou no resumo. Vale ressaltar que a Base *Scopus* não conseguiu identificar o país de origem de 41 artigos.

Ranking dos vinte países que mais publicaram na base de dados Scopus sobre o tema da pesquisa



**Figura 1.4:** Os 20 países que mais publicaram artigos com as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou palavras-chave ou no resumo

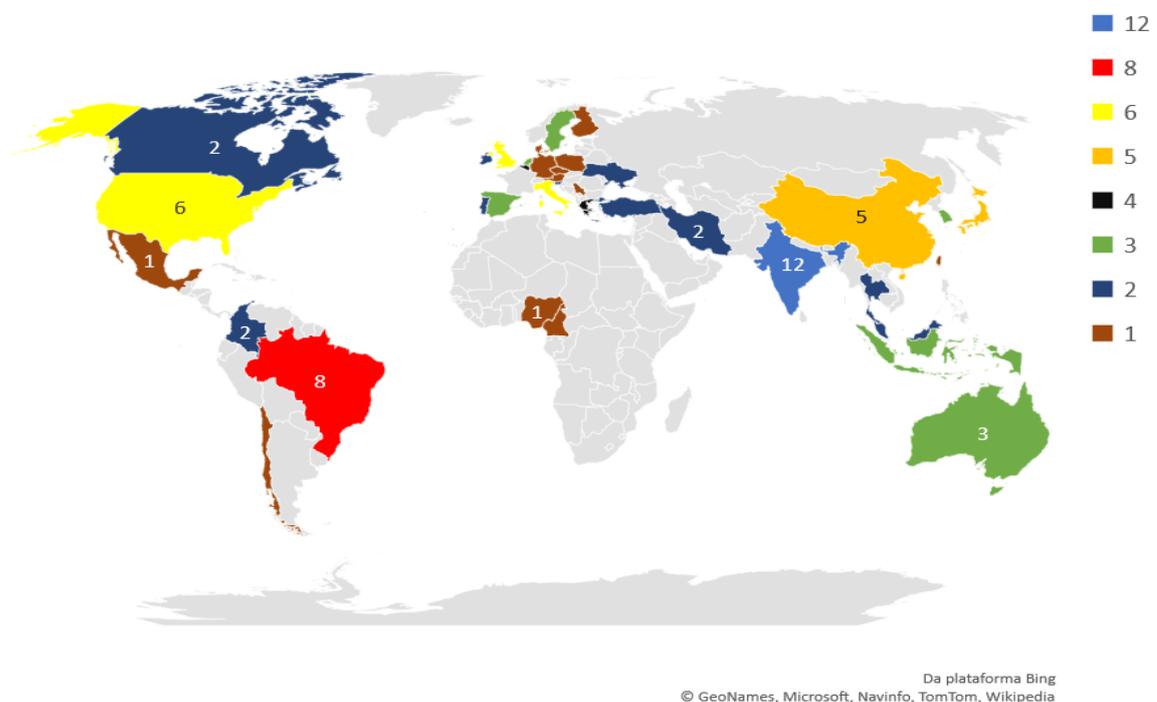
A Figura 1.5 mostra a distribuição dos 371 artigos da base de dados *Scopus* por área temática.



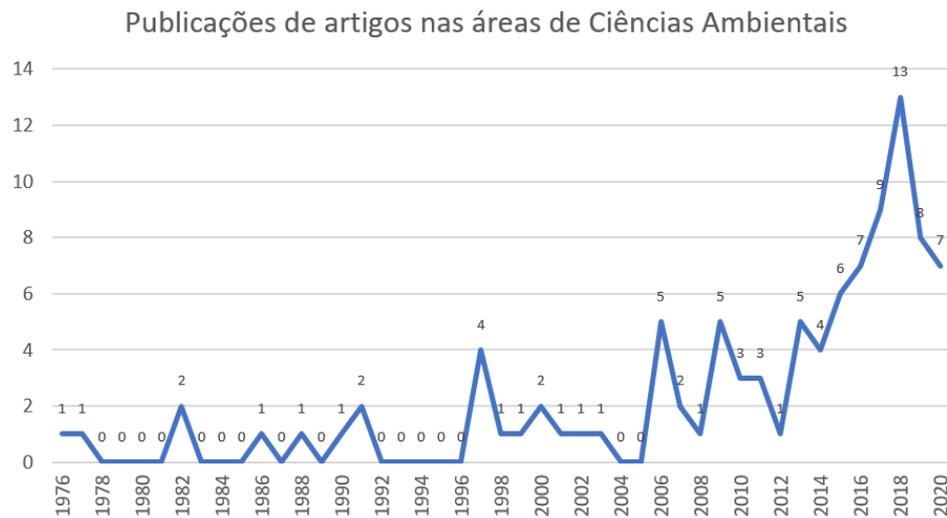
**Figura 1.5:** Artigos encontrados na base de dados Scopus por área temática

A Figura 1.6(a) mostra a distribuição, por país, dos 99 artigos encontrados na base de dados *Scopus* que apresentam as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou nas palavras-chave ou no resumo e que são da área disciplinar de Ciências Ambientais.

Distribuição dos artigos, por país dos autores, na base Scopus



(a)



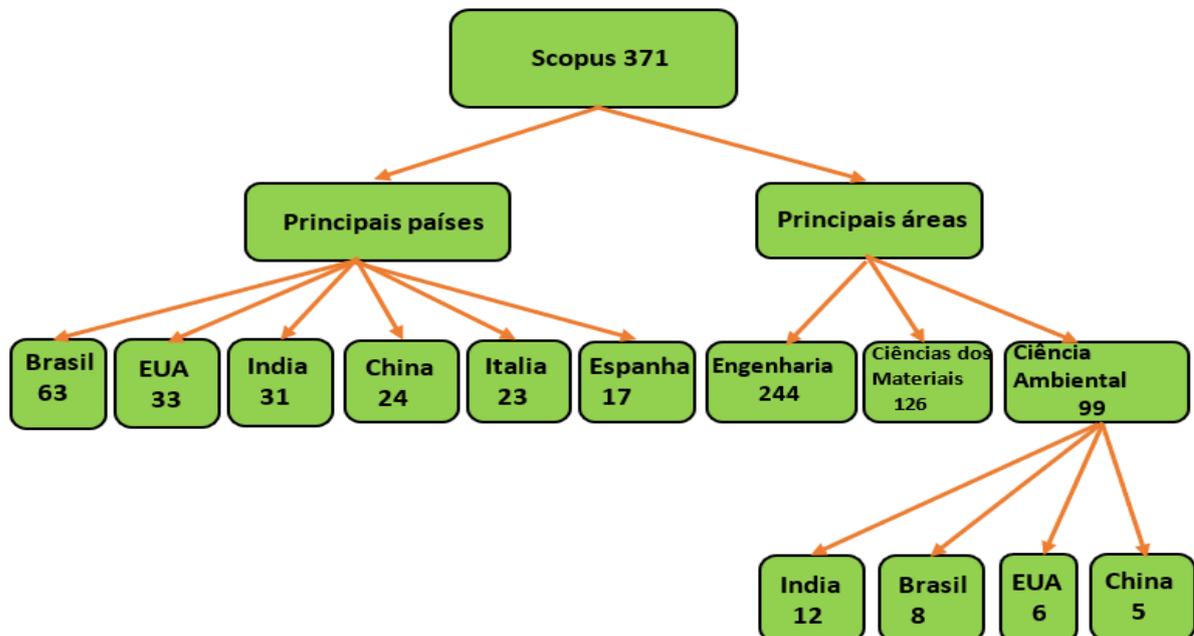
(b)

**Figure 1.6:** Distribuição, por país, dos 99 artigos das áreas de Ciências Ambientais, contendo as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou nas palavras-chave ou no resumo (a) e a evolução do número de publicações (b)

A Figura 1.6 (b) mostra a evolução do número de publicações de artigos das áreas de Ciências Ambientais na base de dados Scopus.

A Figura 1.7 mostra o resumo das principais informações dos dados do artigo obtidas na base de dados Scopus.

### Principais informações da base de dados Scopus



**Figura 1.7:** Resumo das principais informações obtidas na base Scopus de artigos com as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título, resumo ou palavras-chave

### 1.5.1.1 Dados sobre artigos com autores brasileiros

A Figura 1.8 mostra a distribuição, por ano, das publicações de artigos com autores brasileiros com as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou resumo ou nas palavras-chave.



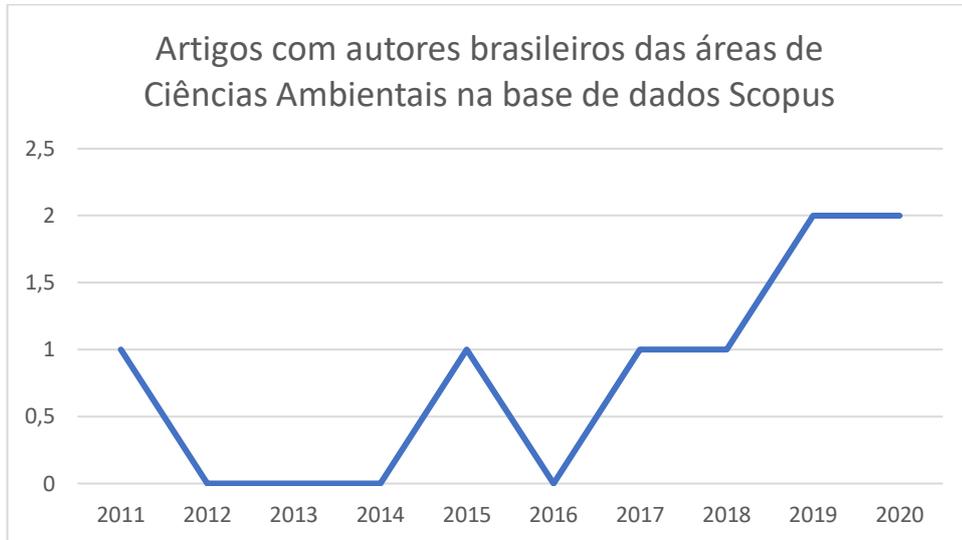
**Figura 1.8:** Evolução do número de publicações de artigos com autores brasileiros com as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou nas palavras-chave ou no resumo

A Figura 1.9 mostra a distribuição dos artigos com autores brasileiros por área.



**Figura 1.9:** Distribuição, por área, dos artigos brasileiros contendo as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou nas palavras-chave ou no resumo, na base Scopus

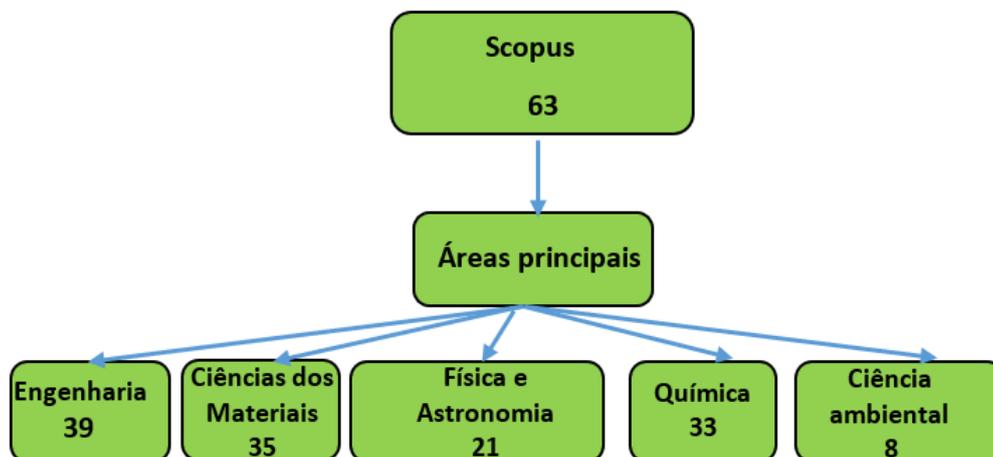
A Figura 1.10 mostra a quantidade de artigos, publicados por ano, de autores brasileiros nas áreas de Ciências Ambientais na base de dados Scopus.



**Figura 1.10:** Distribuição anual de artigos com autores brasileiros de área de Ciência Ambiental na base de dados Scopus

A Figura 1.11 mostra o resumo das principais informações dos dados de artigos com autores brasileiros na base de dados Scopus.

### Principais informações de artigos de autores brasileiros na base de dados Scopus



**Figura 1.11:** Resumo das principais informações obtidas na base Scopus de artigos de autores brasileiros com as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título, resumo ou palavras-chave

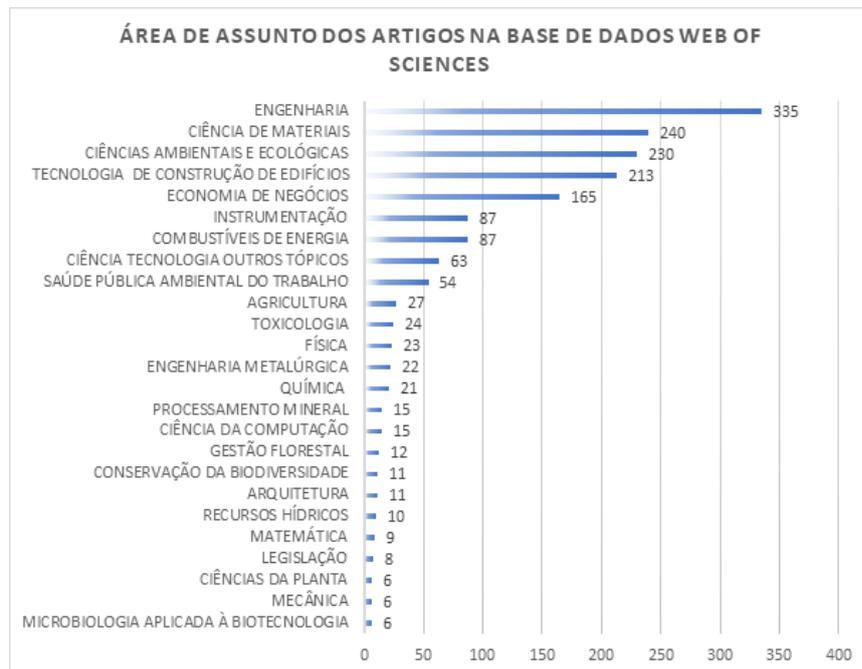
## 1.5.2 Base *Web of Science*

A Figura 1.12 mostra a distribuição, por ano de publicação, dos artigos com as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou nas palavras-chave ou no resumo, na base de dados *Web of Science*.



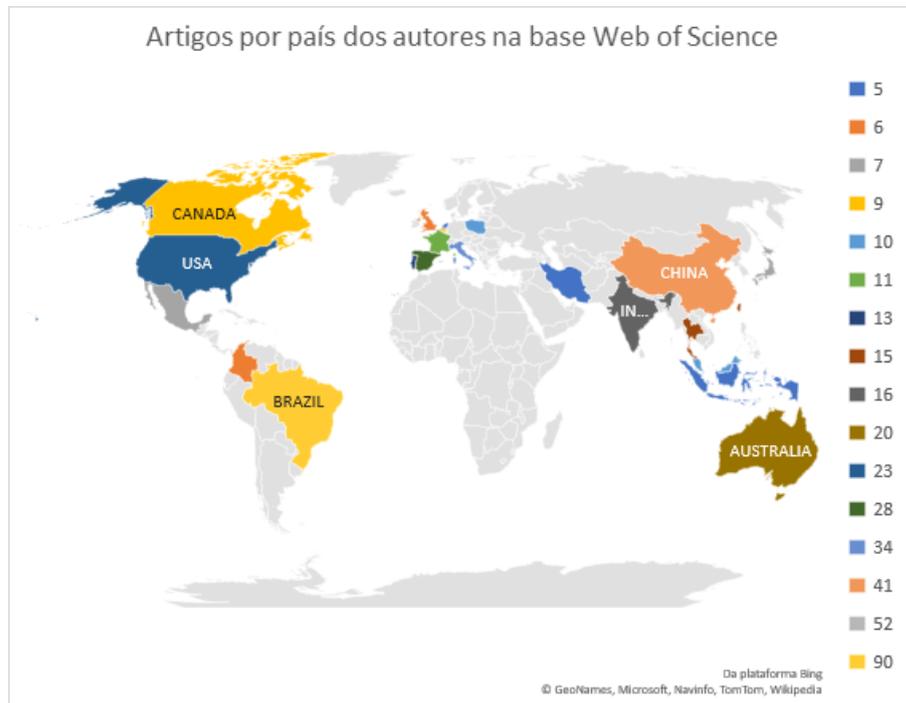
**Figura 1.12:** Artigos com as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou palavras-chave ou resumo da base de dados *Web of Sciences*

A Figura 1.13 mostra a distribuição, por área, dos artigos identificados na base de dados *Web of Science*, com as mesmas características dos artigos pesquisados na base de dados *Scopus*.



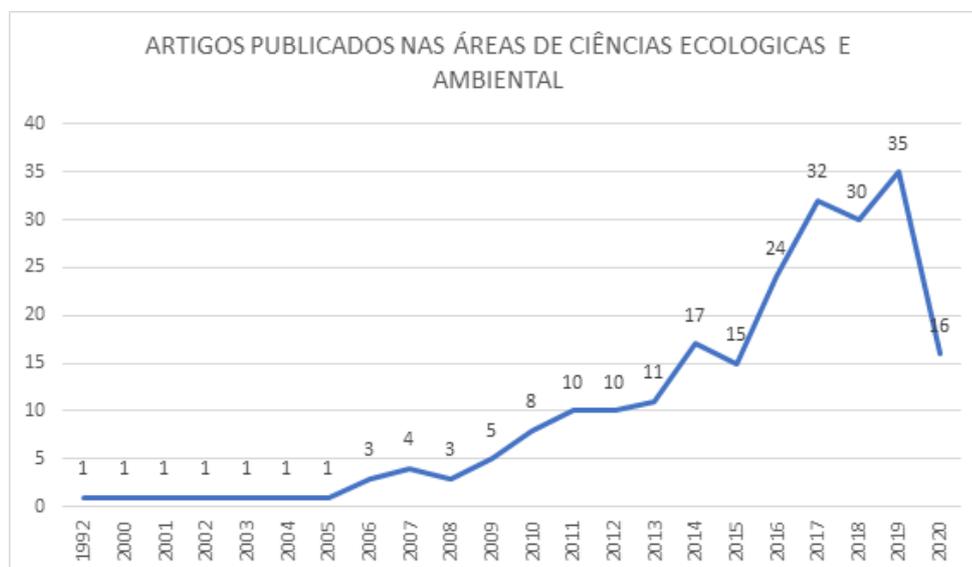
**Figura 1.13:** Distribuição, por área, dos artigos com as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou palavras-chave ou no resumo da base de dados *Web of Sciences*

A Figura 1.14 mostra o número de publicações, distribuídas por país, na base de dados *Web of Science*.



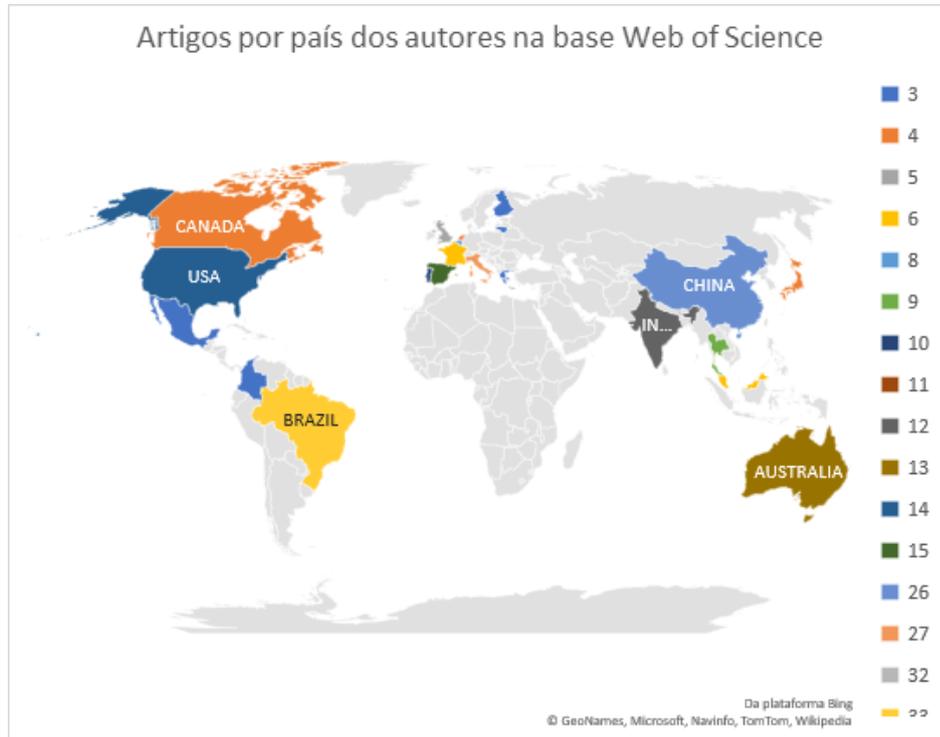
**Figura 1.14:** Distribuição, por país, dos 401 artigos contendo as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou nas palavras-chave ou no resumo

A Figura 1.15 mostra a distribuição, por ano de publicação, dos artigos das áreas de Ciências Ecológicas e Ambiental.



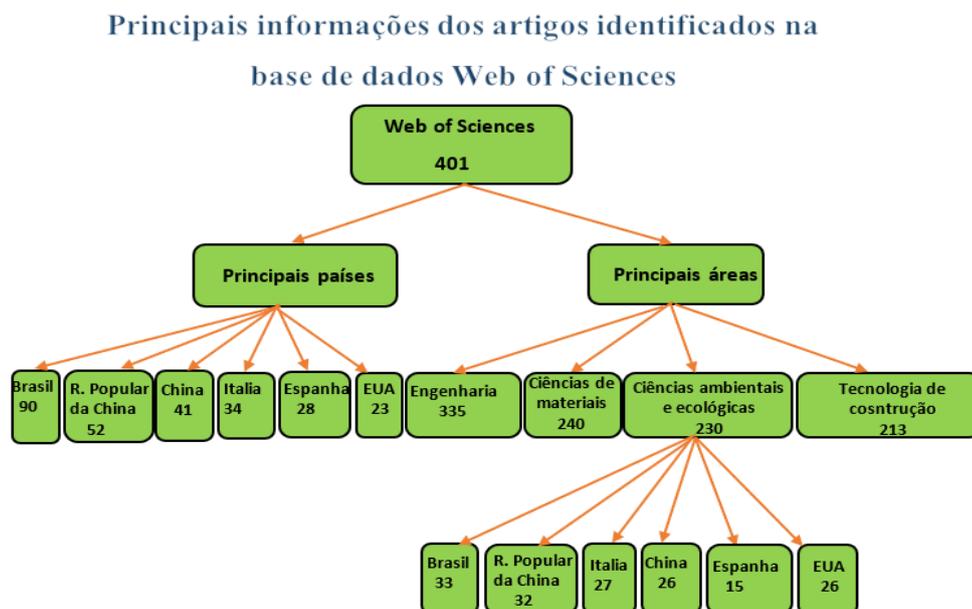
**Figura 1.15:** Distribuição, por ano de publicação, dos artigos das áreas de Ciências Ecológicas e Ambiental, na base de dados *Web of Science*

A Figura 1.6 mostra a distribuição, por país, dos artigos das áreas de Ciências Ambientais.



**Figura 1.16:** Os 230 artigos da área de Ciências Ambientais e Ecológicas, contendo as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou nas palavras-chave ou no resumo na base *Web of Sciences*

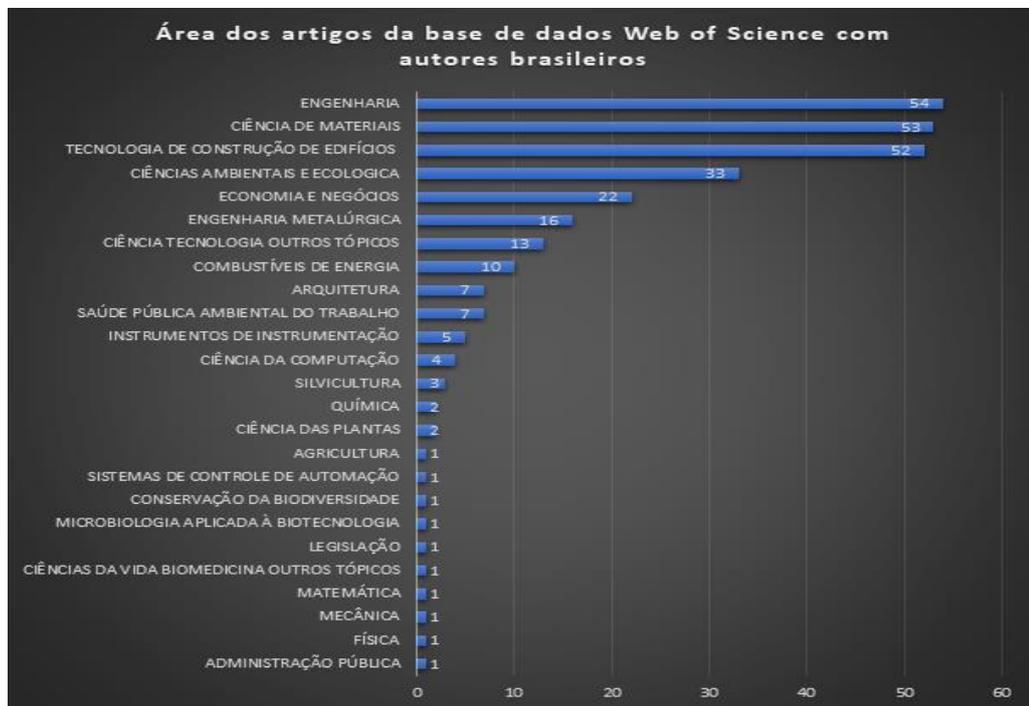
A Figura 1.17 mostra o resumo das principais informações dos artigos obtidas na *Web of Sciences*.



**Figura 1.17:** Resumo das principais informações obtidas na base *Web of Sciences* de artigos com as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título, resumo ou palavras-chave

### 1.5.2.1 Dados sobre artigos com autores brasileiros

A Figura 1.18 mostra a distribuição, por área, dos artigos que possuem as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou nas palavras-chave ou no resumo na base de dados *Web of Science*.



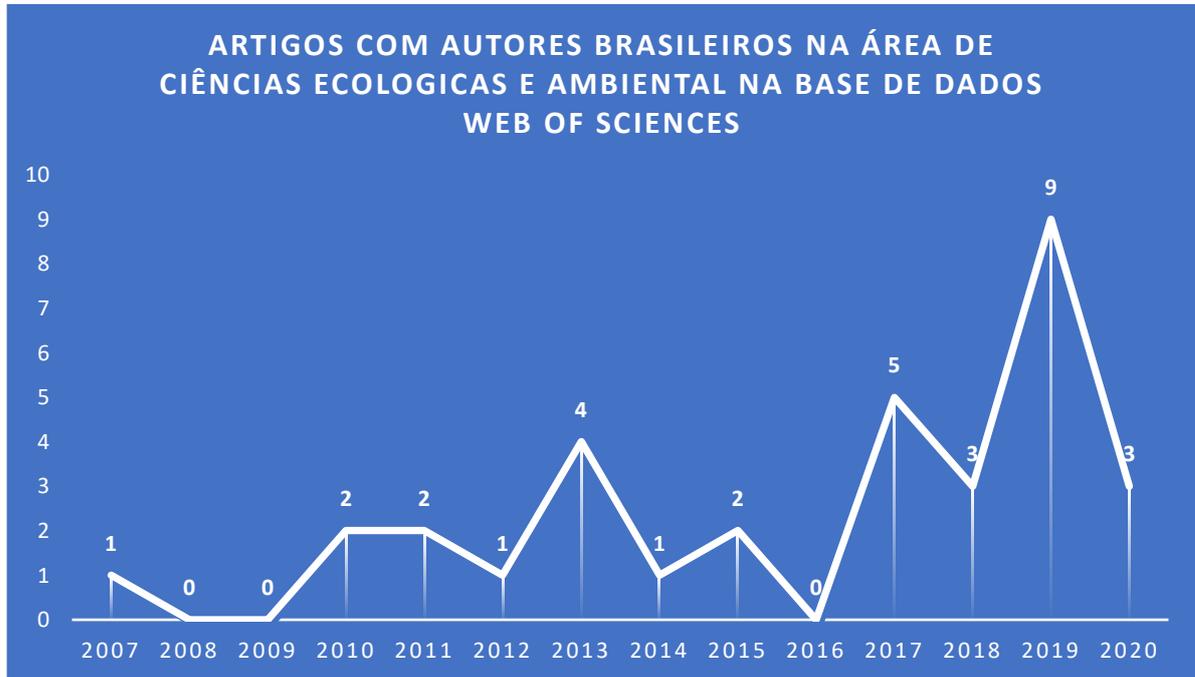
**Figura 1.18:** Distribuição, por área, dos artigos brasileiros na base de dados *Web of Sciences*

A Figura 1.19 mostra a distribuição, por ano de publicação, dos artigos que possuem autores brasileiros.



**Figura 1.19:** Distribuição, por ano de publicação, dos artigos com autores brasileiros, na base de dados *Web of Sciences*

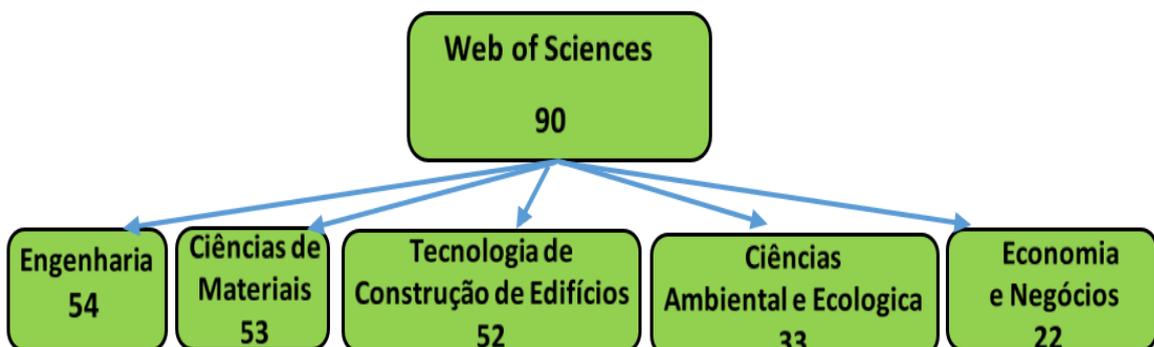
A Figura 1.20 mostra a distribuição, por ano de publicação, dos artigos de autores brasileiros nas áreas de Ciências Ecológicas e Ambiental.



**Figura 1.20:** Distribuição, por ano de publicação, dos artigos brasileiros nas áreas de Ciências Ecológicas e Ambiental na base de dados *Web of Sciences*

A Figura 1.21 mostra o resumo das principais informações dos dados de artigos com autores brasileiros na base de dados *Web of Sciences*.

## Principais informações de artigos com autores brasileiros na base de dados Web of Sciences



**Figura 1.21:** Resumo das principais informações obtidas na base *Web of Sciences* de artigos com autores brasileiros com as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título, resumo ou palavras-chave

### 1.5.3 Análise dos artigos com autores brasileiros

Dentre as principais informações, em relação a artigos com autores brasileiros, destaca-se o fato de o Brasil ocupar o primeiro lugar em número de publicações em ambas as bases. A evolução do número de artigos com autores brasileiros publicados é semelhante nas duas bases e apresenta tendência de alta com pico no número de publicações em 2019.

Seguindo a tendência mundial, o maior número de artigos brasileiros é da área de Engenharia, seguida da área de Ciência dos Materiais, em ambas as bases. Em terceiro lugar, aparecem as áreas de Tecnologia da Construção Civil, na base *Web of Science*, e Física e Astronomia, na base *Scopus*. A área ambiental está na quarta posição, na base *Web of Science*, e na quinta posição, na base *Scopus*. Vale ressaltar que as áreas de Engenharia, Tecnologia da Construção Civil e Ciência dos Materiais estão relacionadas à Engenharia Civil. Dessa forma, é possível afirmar que grande parte dos artigos brasileiros aqui identificados são da área de Engenharia Civil. O fato de a maioria dos artigos de autores brasileiros ser da área de Engenharia Civil pode ter como um dos motivos o grande peso que essa indústria tem na economia brasileira (WILLIAM *et al.*, 2013). Em 2014, a construção civil foi responsável por 14% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil. Essa indústria também tem grande importância social, pois gera grande parte dos empregos para a população mais carente (SANTANA e OLIVEIRA, 2004). Também deve-se considerar que as palavras-chave investigadas aqui estão muito relacionadas à Engenharia Civil. Portanto, é natural obter mais artigos relacionados à Engenharia Civil, como foi o caso.

Ao considerar apenas os artigos com autores brasileiros, a área ambiental ocupa as modestas quarta (base *Web of Science*) e quinta (base *Scopus*) posições no ranking das áreas de estudos. No entanto, ao considerar os artigos com autores de todo o mundo, a posição dos artigos com autores brasileiros da área ambiental é relevante em ambas as bases. Na base *Web of Science* é o país que mais publicou artigos nas áreas ambientais (Figura 1.17) e na base *Scopus* é o segundo (Figura 1.7).

O fato de a área ambiental aparecer logo após as áreas de engenharia é um forte indício de que a questão ambiental é um tema verdadeiramente relevante para o Brasil. No entanto, considerar a questão ambiental relevante não significa ter uma condição confortável em relação ao meio ambiente. Embora o Brasil publique muito sobre a área ambiental, o país tem dificuldade em lidar com a sustentabilidade. Entre os principais motivos dessa dificuldade está a demora do Brasil em realizar ações concretas para o alcance da sustentabilidade. Um exemplo dessa demora são as ações para enfrentar a questão dos resíduos pós-consumo, que tiveram

como marco a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (DEMAJOROVIC e MIGLIANO, 2013). Embora a PNRS tenha sido regulamentada em 23 de dezembro de 2010, ainda enfrenta dificuldades em sua real implementação no que se refere à coleta, reciclagem e logística reversa de diversos resíduos, principalmente o lixo eletrônico (DEMAJOROVIC, AUGUSTO e SOUZA, 2016). A consequência desses atrasos é a dificuldade do país em gerir corretamente seus resíduos, como o lixo eletrônico que, em 2017, obteve uma taxa de coleta estimada de apenas 2% (AZEVEDO *et al.*, 2017).

Para verificar como o Brasil investiga a substituição de agregados naturais por resíduos na construção civil, este presente trabalho elaborou o Quadro 1.1. Esse quadro apresenta as principais informações de artigos da área ambiental, com autores brasileiros, nas bases pesquisadas. Como pode ser observado no Quadro 1.1, o número total de artigos identificados foi de 35. Essa quantidade difere da soma dos artigos identificados na base de *dados Web of Science*, que foi de 33, com o número de artigos identificados na base de dados *Scopus*, que foi de 8. Isso se deve ao fato de cinco artigos estarem nas duas bases simultaneamente.

<b>Quadro 1.1: Principais informações dos artigos com autores brasileiros</b>				
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(COPPIO <i>et al.</i> , 2019)			<i>Construction and Building Materials</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete, aggregate, wast</i>	<i>concrete, aggregate, waste</i>	<i>Concrete</i>	Estudar os efeitos do uso de areia de fundição como agregado fino na mistura de concreto na resistência à compressão e resistividade elétrica superficial.	A resistência à compressão tende a diminuir com o uso de areia residual de fundição como um agregado fino.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(RANGEL <i>et al.</i> , 2019)			<i>Journal of Cleaner Production</i>	Estudo de caso
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete, aggregate,</i>	<i>concrete, aggregate, waste</i>	<i>concrete, aggregate, waste</i>	Encontrar uma possível relação existente entre a origem dos resíduos e as características do concreto de agregados reciclado resultantes	Usar a classificação dos resíduos proposta no trabalho pode promover a reutilização integral dos resíduos em diferentes produtos cimentícios

Artigo			Periódico	Metodologia
(ANJOS, SALES e ANDRADE, 2017)			<i>Journal of Environmental Management</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete, aggregate,</i>	<i>concrete, aggregate, residue</i>	<i>concrete, waste</i>	Avaliar os efeitos da substituição total e parcial do agregado fino por escória de cobre jateada e resíduo de jateamento abrasivo no concreto estrutural de cimento Portland	Apesar da resistência à tração dos concretos diminuir com o aumento do teor de escória de cobre jateada, o trabalho conclui que a substituição total ou parcial dos agregados finos naturais por esse resíduo pode ser viável.
Artigo			Periódico	Metodologia
(AMORIM JÚNIOR, SILVA E RIBEIRO, 2018)			<i>Construction and Building Materials</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete, aggregate,</i>	<i>concrete, aggregate,</i>	<i>aggregate, residue</i>	Verificar a influência do agregado reciclado na durabilidade do concreto submetido aos ciclos de congelamento e descongelamento.	A utilização de agregados reciclados mostrou-se eficiente como possível alternativa à incorporação de ar nos concretos, apresentando um fator de durabilidade ao final do ciclo superior ao apresentado pela mistura de referência.
Artigo			Periódico	Metodologia
(LIMA e IWAKIRI, 2014)			Ciência Florestal	Pesquisa experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete, aggregate, residue</i>	<i>concrete, aggregate, residue</i>	<i>concrete, aggregate,</i>	Avaliar a substituição do agregado miúdo por resíduo do desdobro de toras de <i>Pinus</i> spp na produção de blocos de alvenaria estrutural	Obtiveram-se resultados satisfatórios com substituições de até 50% do agregado miúdo mineral pelo resíduo de <i>Pinus</i> spp.
Artigo			Periódico	Metodologia

(SILVA, DA <i>et al.</i> , 2020)			<i>Waste Management &amp; Research</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>aggregate</i>	<i>aggregate, residue</i>	<i>aggregate, residue</i>	Avaliar o processo de carbonatação ao substituir parte do agregado fino por resíduo de granito na produção da argamassa.	A variável tempo de exposição mostrou ter maior influência no processo de carbonatação. Nas condições analisadas, o resíduo de granito mostrou-se benéfico, reduzindo a profundidade de carbonatação.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(LUIS DE OLIVEIRA JÚNIOR <i>et al.</i> , 2019)			<i>Journal of Building Engineering</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>aggregate, residue</i>	<i>residue, aggregate, waste</i>	<i>residue, waste</i>	Avaliar os efeitos da substituição parcial do agregado natural de areia de uma argamassa ecológica por diferentes porcentagens de resíduo de grãos na resistência à compressão, flexão e tração do material.	Os resultados indicam um potencial da utilização desse resíduo como substituição parcial de agregados finos em argamassas de revestimento e sugerem que 15% pode ser considerada a relação de substituição ideal.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(BACARJI, MARQUES e TOLEDO FILHO, 2012)			<i>Key Engineering Materials</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete, waste</i>	<i>concrete, aggregate, residue, waste</i>	<i>concrete, waste</i>	Estudar a substituição da areia natural por dois resíduos minerais na produção de concreto.	Foi demonstrado que é possível obter concreto estrutural autoadensável, concreto autoadensável sem finalidade estrutural e concreto convencional utilizando resíduos

				minerais em substituição a parte dos agregados naturais.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(CASTRO MENDES <i>et al.</i> , 2020)			<i>Journal of Material Cycles and Waste Management</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>Residue</i>	<i>aggregate, residue</i>	<i>Residue</i>	Verificar a viabilidade de utilização de resíduos de mineração e industriais como agregados de argamassas de revestimento, em termos de desempenho térmico de edifícios.	Argamassas produzida com os resíduos de mineração e industriais podem ser soluções econômicas e sustentáveis para melhorar passivamente o desempenho térmico das edificações, bem como mitigar os impactos do descarte desses resíduos.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(FAVARETTO <i>et al.</i> , 2017)			<i>Applied Sciences-Basel</i>	Estudo de caso
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete, waste</i>	<i>concrete, aggregate, residue, waste</i>	<i>concrete, waste</i>	Avaliar a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) da região de Passo Fundo, Rio Grande do Sul (RS), Brasil, no desenvolvimento de espuma de concreto aerada.	RDC da região do estudo podem ser usados como agregados para o desenvolvimento de espuma de concreto aerada. Porém, deve ser caracterizado antes de ser utilizado para garantir a qualidade do produto final.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(ZERBINO, GIACCIO e ISAIA, 2011)			<i>Construction and Building Materials</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete</i>	<i>concrete, aggregate, residue</i>	<i>concrete, waste</i>	Utilizar a cinza de casca de arroz sem qualquer moagem ( <i>in natura</i> ) para substituir	A incorporação da cinza de casca de arroz natural (sem moagem) no concreto

			parte dos agregados do concreto estrutural.	estrutural representa uma boa alternativa para o descarte desse resíduo, mesmo sem prévio tratamento por meio de um processo de moagem.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(AFONSO <i>et al.</i> , 2013)			<i>Applied Mechanics and Materials</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
	<i>concrete, aggregate, residue</i>		Avaliar a incorporação de lodo no concreto utilizado na fabricação de blocos de concreto.	Foram obtidos traços que produzem blocos que são classificados como estrutural, para utilização em elementos de alvenaria acima do solo, de acordo com a norma brasileira.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(CAETANO, SCHALCH e PABLOS, 2020)			<i>Clean Technologies and Environmental Policy</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete, residue</i>	<i>concrete, aggregate, residue, waste</i>	<i>concrete, residue, waste</i>	Caracterizar a fração fina de ASR (resíduo de trituração automotiva) gerada em uma planta automotiva localizada no Brasil. Também é proposta a sua reciclagem em blocos de concreto para pavimentação em substituição ao agregado fino natural através da técnica de solidificação / estabilização do cimento Portland.	Os blocos de pavimentação de concreto apresentaram bom desempenho mecânico e físico. Portanto, o bloco de pavimentação de concreto produzido pode ser usado como uma solução potencial para a mitigação do impacto ambiental causado pela fração fina dos resíduos de ASR
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(PELISSER <i>et al.</i> , 2011)			<i>Journal of Cleaner Production</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		

<i>concrete</i>	<i>concrete, aggregate, residue</i>	<i>Concrete</i>	Investigar o potencial de uso de borrachas recicladas de pneus em matrizes de cimento.	O concreto emborrachado pode apoiar a sustentabilidade da construção, minimizar o consumo de recursos naturais com a utilização de um resíduo industrial e produzir um material com características especiais.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(GRANZOTTO e SOUZA, 2013)			<i>Acta Scientiarum-Technology</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete, aggregate</i>	<i>concrete, aggregate, waste</i>	<i>Residue</i>	Analisar o comportamento do concreto produzido com diferentes proporções de substituição de agregado fino por resíduos de borracha de pneus.	Resultados experimentais revelaram que adições de borracha de até 5% em substituição à areia podem produzir concretos com resistência média à compressão e à tração semelhante à obtida para o concreto de resistência normal.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(FIORITI, INO e AKASAKI, 2010)			<i>Acta Scientiarum-Technology</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete, residue</i>	<i>concrete, aggregate, residue</i>	<i>concrete, residue</i>	Investigar a possibilidade de utilizar resíduos de pneus como parte da matéria prima na produção de blocos intertravados.	Blocos intertravados com resíduos de pneus podem ser utilizados em alguns ambientes como calçadas, praças, ciclovias e condomínios residenciais.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(SALES <i>et al.</i> , 2010)			<i>Construction and Building Materials</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		

<i>concrete</i>	<i>concrete, aggregate, residue</i>	<i>Concrete</i>	Avaliar o potencial de aplicação de um concreto leve produzido com agregado graúdo leve à base de lodo de tratamento de água e serragem.	O concreto deste estudo apresentou um conjunto de propriedades térmicas adequadas à aplicação desse concreto em elementos de vedação não estruturais.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(PAZ e SANTOS, 2019)			Revista Eletrônica em Gestão Educação e Tecnologia Ambiental	Pesquisa Experimental
<i>Palavras aggregate, residue and concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete</i>	<i>concrete, aggregate, residue</i>	<i>Concrete</i>	Analisar o desempenho mecânico do concreto produzido com resíduos de vidro de embalagens não retornáveis.	O concreto com a utilização do vidro moído obteve uma resistência média de 32,37 MPa. Esse resultado indica uma viabilidade técnica da utilização do resíduo.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(OLIVEIRA ANDRADE, de <i>et al.</i> , 2018)			<i>Journal of Cleaner Production</i>	Pesquisa Experimental
<i>Palavras aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>aggregate</i>	<i>aggregate, residue, waste</i>	<i>Aggregate</i>	Investigar as propriedades mecânicas (resistência a tração, resistência à compressão e resistência à flexão), durabilidade (absorção de água) e análise microestrutural de argamassas de revestimento com diferentes níveis de substituição (2,5% em peso, 5% em peso, 7,5% em peso e 10% em peso) de areia natural por agregado de lodo de tratamento de água.	De maneira geral, este estudo mostrou que o resíduo, como fonte de agregados de argamassa fina, pode ser considerado uma alternativa viável e sustentável para uso no setor de construção. O melhor resultado foi obtido com a substituição de 5% de areia natural por lodo.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(COPETTI <i>et al.</i> , 2020)			<i>Journal of Cleaner Production</i>	Pesquisa Experimental

Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete</i>	<i>concrete, residue, aggregate, waste</i>	<i>Concrete</i>	Avaliar a influência de um pré-tratamento químico com solução de hidróxido de sódio (NaOH) nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de concretos com dois teores de resíduos de borracha (15% e 30%) como substituição natural do agregado fino, e a adição de sílica ativa (7,5% e 15%) para substituir o cimento Portland.	Embora muitos fatores ainda precisem ser investigados, verificou-se que o reaproveitamento do resíduo de borracha no concreto, sem nenhum pré-tratamento, não interfere significativamente nas propriedades investigadas. Além disso, evita custos de pré-processamento e pode contribuir para uma destinação adequada deste material.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(MOLIN FILHO e LONGHI, <i>et al.</i> , 2019)			<i>Environment Development and Sustainability</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
	<i>aggregate, residue</i>	<i>concrete, residue</i>	Desenvolver argamassas autocompactantes com substituição parcial de areia por cinza de bagaço de cana-de-açúcar (SCBA).	Com substituição de 40% de areia por SCBA, foi possível reduzir em até 489 kg de areia e 56 kg de cimento, para produzir um metro cúbico de argamassa autoadensável com cinza de bagaço de cana.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
REIS e JURUMENHA, 2013)			<i>Materials and Structures</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>aggregate</i>	<i>aggregate, residue, waste</i>		Examinar as propriedades mecânicas, resistência à compressão e flexão, de argamassas poliméricas (AP) feitas com resíduos de fundição usados, ou seja, areia de fundição	Areia de fundição reciclada pode ser usada de forma muito conveniente para produzir AP e materiais de construção de qualidade aceitável.

			impregnada com polímero como agregado.	
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(CANOVA, BERGAMASCO e ANGELIS NETO, 2008)			<i>Acta Scientiarum-Technology</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete, aggregate, waste</i>	<i>aggregate, residue</i>	<i>Residue</i>	Avaliar uma argamassa de revestimento com resíduos de pneus.	O produto estudado é uma alternativa que contribui para a redução de fissuras em revestimentos argamassados.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(ALMEIDA <i>et al.</i> , 2015)			<i>Construction and Building Materials</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
	<i>aggregate, residue</i>		Investigar o efeito da reia de cinza do bagaço da cana nas argamassas. Especificamente em sua resistência à compressão, porosidade, profundidade de carbonatação e penetração de cloretos.	A substituição da areia natural pela areia de cinza do bagaço da cana, principalmente na proporção de 30%, pode levar à manutenção das propriedades mecânicas, entupimento dos microporos e melhoria da durabilidade das argamassas, em comparação com a mistura de referência.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(MOLIN FILHO, <i>et al.</i> , 2019)			<i>Clean Technologies and Environmental Policy</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
	<i>aggregate, residue</i>	<i>Residue</i>	Caracterizar as cinzas de fundo, volantes e misturadas, submetidas a processamentos de baixo custo, a fim de fazer um	A amostra de cinza volante, sem requeima e com organização estrutural amorfa, atende aos pré-requisitos para avaliações

			melhor direcionamento de suas aplicabilidades em produtos para construção civil.	de aplicações pozolânicas em substituição parcial de materiais cimentícios
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(TONET e GORNINSKI, 2013)			<i>Construction and building Materials</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete, waste</i>	<i>concrete, aggregate, residue waste</i>	<i>Concrete</i>	Desenvolver compósitos poliméricos inovadores produzidos com resíduos de alumina industrial, um subproduto da indústria do aço.	O concreto polimérico confeccionado com resina reciclada neste estudo apresentou valores de resistência à compressão entre 65,4 e 80,2 MPa. Isso mostra que é possível produzir compósitos de CP (Concreto de polímero) que atendam às necessidades atuais do setor da construção civil por materiais ecologicamente corretos, sem comprometer suas propriedades.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(DURANTE INGUNZA, CAMARINI E MURILO SILVA DA COSTA, 2018)			<i>Construction and Building Materials</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
	<i>Residue</i>		Estuda o desempenho de argamassas com adição de cinza de lodo de fossa séptica (CLFS).	Os resultados mostram que a adição de CLFS melhora o estado geral das argamassas, dentro dos limites estudados neste trabalho, proporcionando melhor desempenho, tanto no estado fresco quanto no endurecido.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(MODOLO <i>et al.</i> , 2015)			<i>Fuel Processing Technology</i>	Pesquisa Experimental

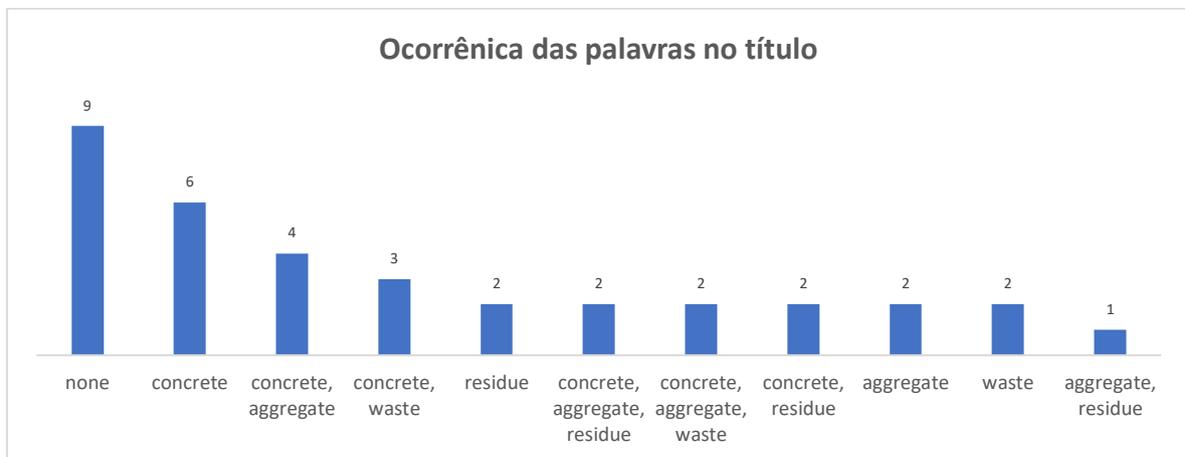
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
	<i>Aggregate residue</i>	<i>Aggregate</i>	Investigar a utilização do resíduo de cinza de biomassa florestal como agregado em malha cimentícia-adesiva.	A utilização desse tipo de resíduo como matéria prima na produção de malha cimentícia-adesiva, proporciona benefícios ambientais com vantagens econômicas para os produtores de argamassas adesivas.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(ROSADO <i>et al.</i> , 2019)			<i>Waste Management</i>	Estudo de caso/Avaliação de ciclo de vida
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>Waste</i>	<i>Residue, waste</i>	<i>Waste</i>	Avaliar o desempenho ambiental da gestão de resíduos de construção e demolição (C&DW) na área da Bacia Hidrográfica PCJ, localizada no Estado de São Paulo, Brasil, por meio de uma Avaliação do Ciclo de Vida atribucional.	De forma geral, os resultados destacaram a importância dos impactos evitados dos materiais recuperados, principalmente aqueles relacionados à reciclagem de aço, vidro e plástico. Nesse sentido, os municípios devem investir em programas de incentivo à triagem nos canteiros de obras, melhorando a qualidade dos materiais recuperados e aumentando os índices de reciclagem.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(HACKENHAAR <i>et al.</i> , 2019)			<i>Sustainable Built Environment D-A-Ch Conference 2019 (SBE19 GRAZ)</i>	Estudo de caso/Avaliação de ciclo de vida do produto
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>Waste</i>	<i>aggregate, residue,</i>		Explorar as premissas básicas na proposição de um	A identificação e disponibilidade de

	<i>waste</i>		sistema de produtos para o processo de reciclagem de RCD (resíduos de construção e demolição) no Brasil.	informações sobre a representação da reciclagem de RCD no cenário econômico brasileiro pode, juntamente com o inventário de outras informações, corroborar com a elaboração de dados de mercado para o Brasil.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(CARVALHO <i>et al.</i> , 2017)			<i>Resources, Conservation &amp; Recycling</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
	<i>Waste</i>	<i>Residue</i>	Avalia a substituição parcial da escória de alto forno por escória BOF (escória do forno básico de oxigênio) na produção de cimento Portland.	O cimento com adição de escória de forno a oxigênio obteve ganho de resistência inicial e final para todos os níveis de reposição. A utilização da escória BOF como substituição parcial da escória de alto forno mostra-se uma alternativa técnica, econômica e ambientalmente viável para a indústria cimenteira.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(BORGES MARINHO <i>et al.</i> , 2017)			<i>Journal of Materials in Civil Engineering</i>	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
	<i>Waste</i>	<i>Waste</i>	Desenvolver um ligante sustentável obtido a partir do LFS (ladle furnace slag - escória do forno panela), um subproduto do refino secundário do aço, em substituição à cal hidráulica.	Os resultados obtidos indicam a viabilidade técnica da utilização do LFS como ligante para argamassas na substituição da cal.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>

(MIZABOTA, CASSIOLATO e MALTONI, 2017)			Ciência Florestal	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>Residue</i>	<i>Residue</i>		Avaliar o crescimento de mudas de <i>Dipteryx alata</i> (baru) e <i>Astronium fraxinifolium</i> (gonçalo-alves) em solo degradado, compactado ou não, suplementado com resíduo agroindustrial e verificar a possibilidade de uso deste como condicionante do solo.	O resíduo agroindustrial influenciou as condições químicas do solo degradado, elevando o pH e os teores de K, Ca e Mg, podendo ser utilizado como condicionante de solo; O <i>Dipteryx alata</i> teve a massa fresca da raiz influenciada negativamente pela compactação e se mostrou pouco exigente em relação à adição de nutrientes
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(MARTINS e ALTOÉ, 2015)			Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá (PR)	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	Principais Conclusões ou Propostas
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		
<i>concrete</i>	<i>concrete, aggregate, residue</i>		Estudar a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) na substituição do agregado miúdo na confecção de blocos de concreto para pavimentação ( <i>pavers</i> ), sujeitos a solicitações leves.	A CBC mostrou-se um resíduo viável para a substituição parcial do agregado miúdo na fabricação dos <i>pavers</i> por apresentar uma melhora expressiva das características analisadas (resistência à compressão, absorção e abrasão) em relação aos <i>pavers</i> fabricados sem a substituição parcial da areia pela CBC.
<b>Artigo</b>			<b>Periódico</b>	<b>Metodologia</b>
(GARCIA, BARRETO e CRISPIM, 2018)			Sustentabilidade em Debate	Pesquisa Experimental
Palavras <i>aggregate, residue e concrete</i>			Objetivos	

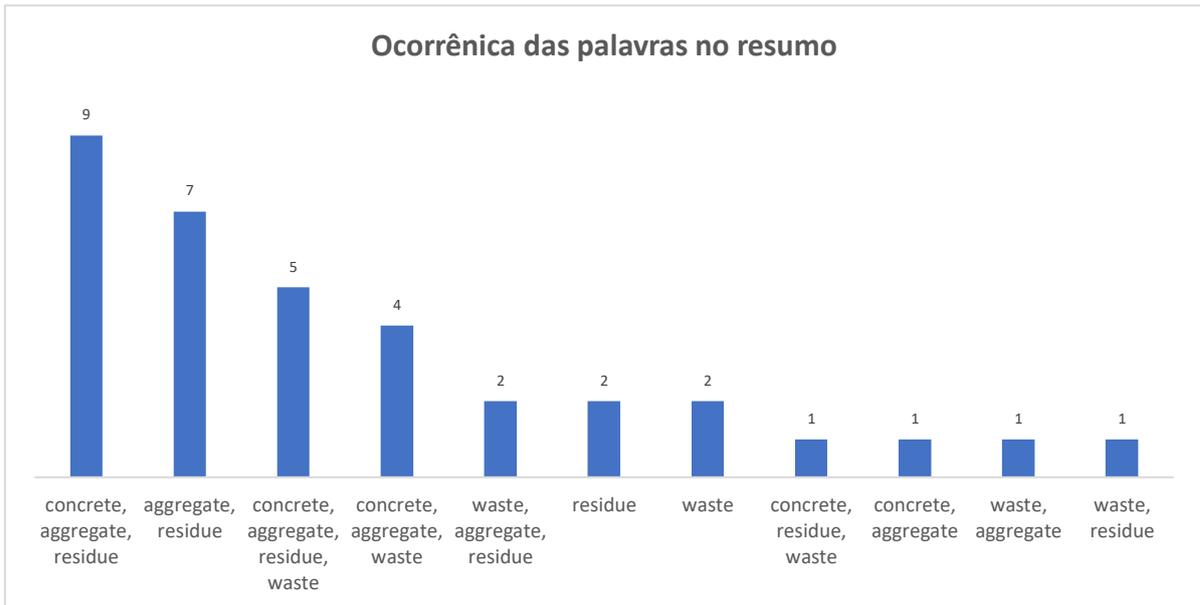
<i>Title</i>	<i>Abstract</i>	<i>Keywords</i>		Principais Conclusões ou Propostas
<i>concrete</i> <i>Aggregate</i> <i>Residue</i>	<i>concrete,</i> <i>aggregate,</i> <i>residue</i>	<i>Residue</i> <i>Aggregatr</i>	Analisar o emprego de resíduos de blocos de concreto em substituição aos agregados minerais em pavimentação asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).	Os resultados demonstraram que os compósitos com substituições de agregados minerais, de até 40% em massa, atendem aos requisitos estabelecidos e podem ser utilizados na pavimentação asfáltica.

A Figura 1.22 mostra a ocorrência das palavras investigadas por este presente trabalho no título.



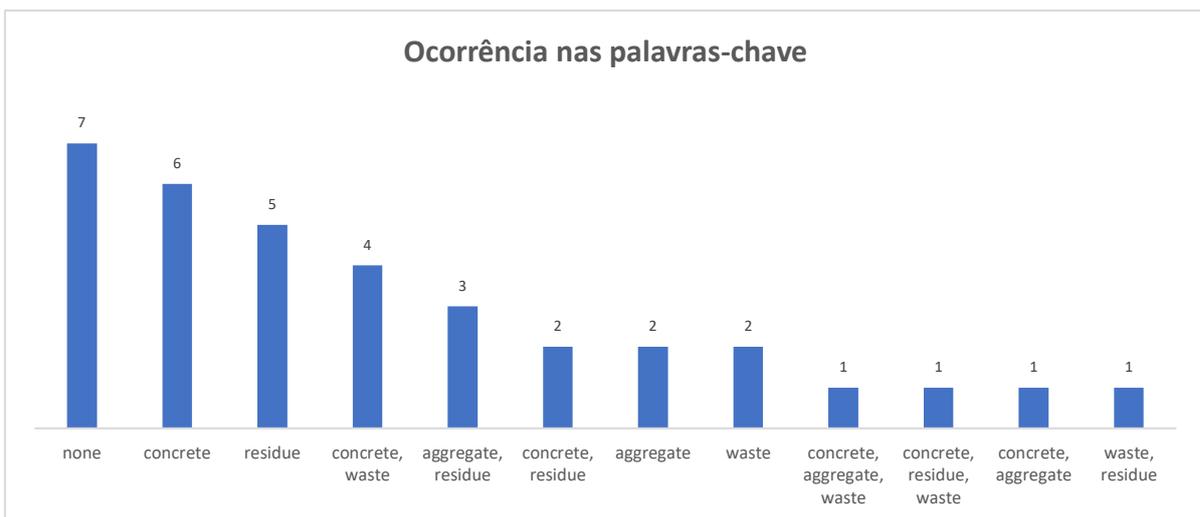
**Figura 1.22:** Ocorrência das palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título de artigos com autores brasileiros da área de meio ambiente

A Figura 1.23 mostra a ocorrência das palavras investigadas por este trabalho no resumo.



**Figura 1.23:** Ocorrência das palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no resumo de artigos de autores brasileiros da área ambiental

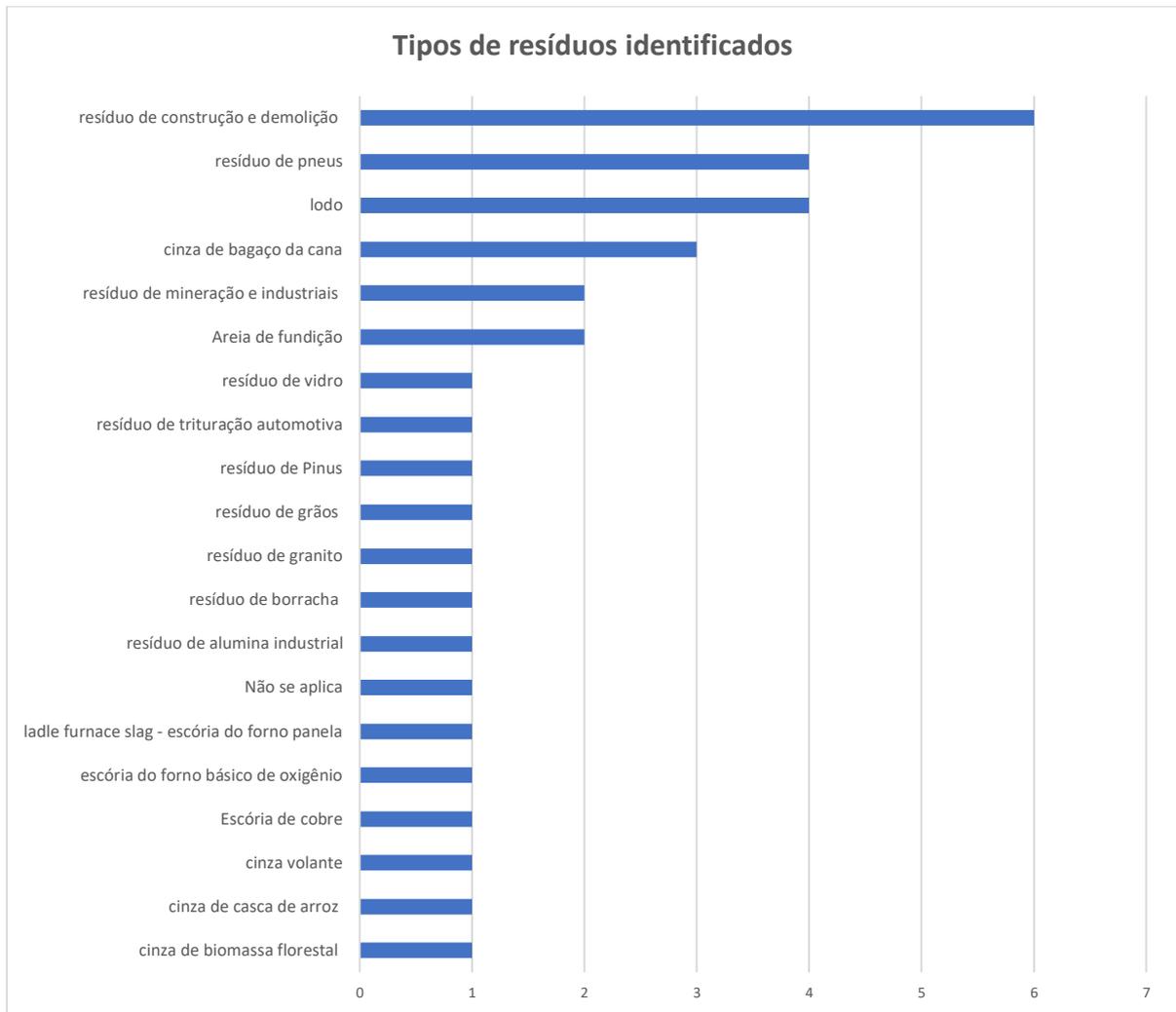
A Figura 1.24 mostra a ocorrência das palavras investigadas por este trabalho nas palavras-chave.



**Figura 1.24:** Ocorrência das palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* nas palavras-chave de artigos com autores brasileiros da área ambiental

A Figura 1.25 mostra os tipos de resíduos, que foram estudados como substitutos de matérias-primas na indústria da construção, nos artigos fornecidos pelas ferramentas das bases.

A primeira informação que este presente trabalho destaca do Quadro 1.1 é que a maioria dos estudos utilizou método de pesquisa experimental, com 31 artigos, representando mais de 88% dos artigos. O restante dos artigos utilizou método de estudo de caso, dois dos quais analisaram o ciclo de vida do produto.



**Figura 1.25:** Tipos de resíduos utilizados como substitutos de agregados naturais na construção civil

O presente trabalho utilizou as ferramentas das bases de dados *Scopus* e *Web of Science* para identificar artigos que continham as palavras *aggregate*, *residue* e *concrete* no título ou resumo ou palavras-chave. Porém, essas ferramentas retornaram artigos que não atendiam aos parâmetros da pesquisa, como pode ser visto nas Figuras 1.23, 1.24 e 1.25.

Ao analisar as informações dos artigos, fornecidas pelas ferramentas das bases de dados em relação ao título dos artigos (Figura 1.22), é possível verificar que apenas dois artigos atenderam aos parâmetros da pesquisa. Em relação às informações sobre o resumo (Figura 1.23), apenas 14 artigos. E, por fim, em relação às palavras-chave (Figura 1.24), nenhum artigo foi identificado. É importante destacar que em cinco artigos todas as três palavras investigadas por este trabalho apareceram em dois itens, ou seja, no título ou no resumo, no título ou nas palavras-chave ou no resumo e palavras-chave. Assim, dos 35 artigos disponibilizados pelas

ferramentas dos bancos de dados, apenas 11 atenderam integralmente aos parâmetros de pesquisa.

Ao considerar a palavra “*waste*”, que é sinônimo de resíduo, o número de artigos que atenderam aos parâmetros de busca são 4, 18 e 1 para os títulos, resumo e palavras-chave, respectivamente. Subtraindo os cinco artigos que contêm as palavras em mais de um item, obtém-se um total de 18 artigos. Assim, mesmo validando a palavra “*waste*”, quase 50% dos artigos disponibilizados nas bases de dados não atenderam aos parâmetros da pesquisa.

Vale destacar as informações apresentadas na Figura 1.25, onde mostra que o resíduo mais estudado, pelos artigos selecionados é o resíduo da própria construção civil. Esse fato mostra que as pesquisas brasileiras seguem a tendência mundial, uma vez que os resíduos da construção civil são os mais investigados para serem utilizados como substitutos de matéria-prima nessa indústria.

Outro destaque importante que pode ser observado nos dados da Figura 1.25 é em relação aos resíduos agrícolas. Existem vários tipos de resíduos agrícolas sendo investigados nestes artigos. Assim, se os resíduos agrícolas fossem agrupados em um único tipo de resíduo, ocuparia a primeira posição, com sete artigos.

#### **1.5.4 Considerações no nível global**

Os resultados mostraram que foram encontrados 371 artigos na base de dados *Scopus* e 401 na base de dados *Web of Science* com as características investigadas neste trabalho. O primeiro artigo com essas características identificado na base de dados *Scopus* foi publicado em 1963. Na base de dados *Web of Science* foi em 1996. A tendência na evolução anual das publicações é semelhante em ambas as bases (Figuras 1.4 e 1.13), evidenciando uma tendência de aumento do número de publicações desde 2006. Ambas as bases também têm seu pico de publicações em 2019. É importante destacar que os dados para 2020 referem-se até 30/09/2020 para a base de dados *Scopus* e até 07/10/2020 para a base de dados *Web of Science*.

Assim, é muito provável que o pico de publicações seja no ano de 2020, confirmando a tendência de aumento das publicações em ambas as bases.

Ao analisar a distribuição dos artigos por país, verifica-se que, em ambas as bases, o Brasil é o país que mais publicou artigos com as características investigadas neste trabalho. Aqui fica uma observação do que provavelmente é uma inconsistência na base da *Web of Science*, em relação às publicações de artigos com autores brasileiros. A constatação é que, no dia da pesquisa, a base de dados mostrava que haviam 85 artigos com autores do Brasil e 5

artigos com autores do “Brazil”. Ou seja, são 90 artigos com autores do Brasil. Parece que a base de dados *Web of Science* não conseguiu identificar que “Brazil” é a grafia do Brasil em Inglês. Há também uma observação em relação à base *Scopus*. A observação é que a base de dados não conseguiu identificar o país dos autores de 41 artigos. Esse número ocupa a segunda posição no ranking de publicações por país, ou seja, fica atrás apenas do Brasil, que tem o maior número de artigos publicados. Isso mostra que essa inconsistência é significativa.

Em relação à área temática, as Figuras 1.6 e 1.14 mostram que a área que mais publicou artigos foi a Engenharia, seguida das áreas de Ciência dos Materiais e Meio Ambiente, em ambas as bases. Este resultado já era esperado uma vez que o estudo de agregados para concreto está estreitamente ligado à Engenharia Civil e à Ciência dos Materiais. O fato de a área ambiental ser a terceira área com mais publicações também era esperado. Dentre as razões para esse resultado, o presente trabalho destaca o fato de que o uso eficiente dos recursos naturais é a principal agenda política, social e econômica global (FARGNOLI, MINICIS, DE e TRONCI, 2014). Com isso, os consumidores estão exigindo que as indústrias, como a da Construção Civil, que é a maior responsável pela extração de recursos da natureza (Mefteh *et al.*, 2013), adotem processos sustentáveis para a produção de seus produtos (ADEYEYE, SHE E BAÏRI, 2017), obrigando-as a investir em pesquisas na área.

A análise dos dados referentes aos artigos da área ambiental assemelha-se notavelmente à análise feita referente aos dados do total de artigos nas duas bases de dados. O primeiro artigo, na base de dados *Scopus*, foi publicado em 1976 e na base de dados *Web of Science* em 1992. A tendência, em ambas as bases, é de crescimento a partir de 2006, mesma tendência observada nas duas bases ao se analisar artigos de todas as áreas. As diferenças relevantes em relação à evolução do número de publicações foram encontradas na base de dados *Scopus*. A primeira diferença é que o pico no número de publicações foi em 2018, ao contrário do pico de publicações em artigos de todas as áreas, que foi em 2019. A segunda diferença é que houve uma diminuição no número de publicações de artigos da área ambiental em 2019, enquanto o número de publicações de artigos em todas as áreas aumentou. A terceira diferença é que o Brasil passa a ser o segundo país a publicar artigos com as características estudadas neste trabalho. A Índia fica em primeiro lugar. A quarta e última diferença é a inclusão do Reino Unido entre os principais países que publicaram artigos.

Outro fator importante que justifica os posicionamentos das áreas de engenharia e meio ambiente é a crescente preocupação com a destinação dos resíduos da própria indústria da construção civil, visto que esse tipo de resíduo ocupa muito espaço em aterros sanitários em todo o mundo (TAM, SOOMRO e EVANGELISTA, 2018). Este fator, aliado ao fato de a

construção civil ser uma grande consumidora de recursos naturais, faz com que as preocupações com a sustentabilidade ocupem cada vez mais espaço neste setor (SAIEG *et al.*, 2018). O resultado dessas preocupações é a produção de mais pesquisas envolvendo as áreas de engenharia e meio ambiente. Essas pesquisas têm como foco principal a substituição de agregados naturais por reciclados, uma vez que as matérias-primas, como os agregados usados no concreto, são finitas (ONUAGULUCHI e PANESAR, 2014).

## 1.6 Estrutura do trabalho

O trabalho inicia, neste atual Capítulo, onde apresenta como a questão do DS faz parte da agenda global. Também mostra que a destinação dos resíduos, principalmente os eletrônicos, é causa de grande preocupação por parte de toda a sociedade e que, apesar dessa preocupação, a grande maioria do lixo eletrônico ainda não tem um tratamento adequado, principalmente em países como o Brasil e a China. Além disso, esse primeiro capítulo apresenta ainda as justificativas e contribuições deste presente trabalho. Finalmente, através de uma análise bibliométrica, é verificado o estado da arte, identificando os tipos de resíduos que estão sendo investigadas como substitutos de matéria prima na indústria da construção civil. Também faz parte desse tópico dar um panorama do Brasil em relação à pesquisas sobre meio ambiente.

No Capítulo 2 trata-se da Fundamentação Teórica. O primeiro tópico desse capítulo define lixo eletrônico e analisa sua composição. Também é realizada uma revisão da literatura sobre a produção e tratamentos dados ao lixo eletrônico, tanto no nível mundial como nacional. O segundo tópico verifica a tendência da produção de lixo eletrônico no Brasil. Para auxiliar nessa análise, o trabalho compara a produção de computadores no Brasil com a evolução do PIB brasileiro, ambos no período de 2000 a 2015. No terceiro e último tópico é mostrada a definição e os conceitos do experimento com misturas, método esse que foi utilizado neste trabalho como procedimento metodológico.

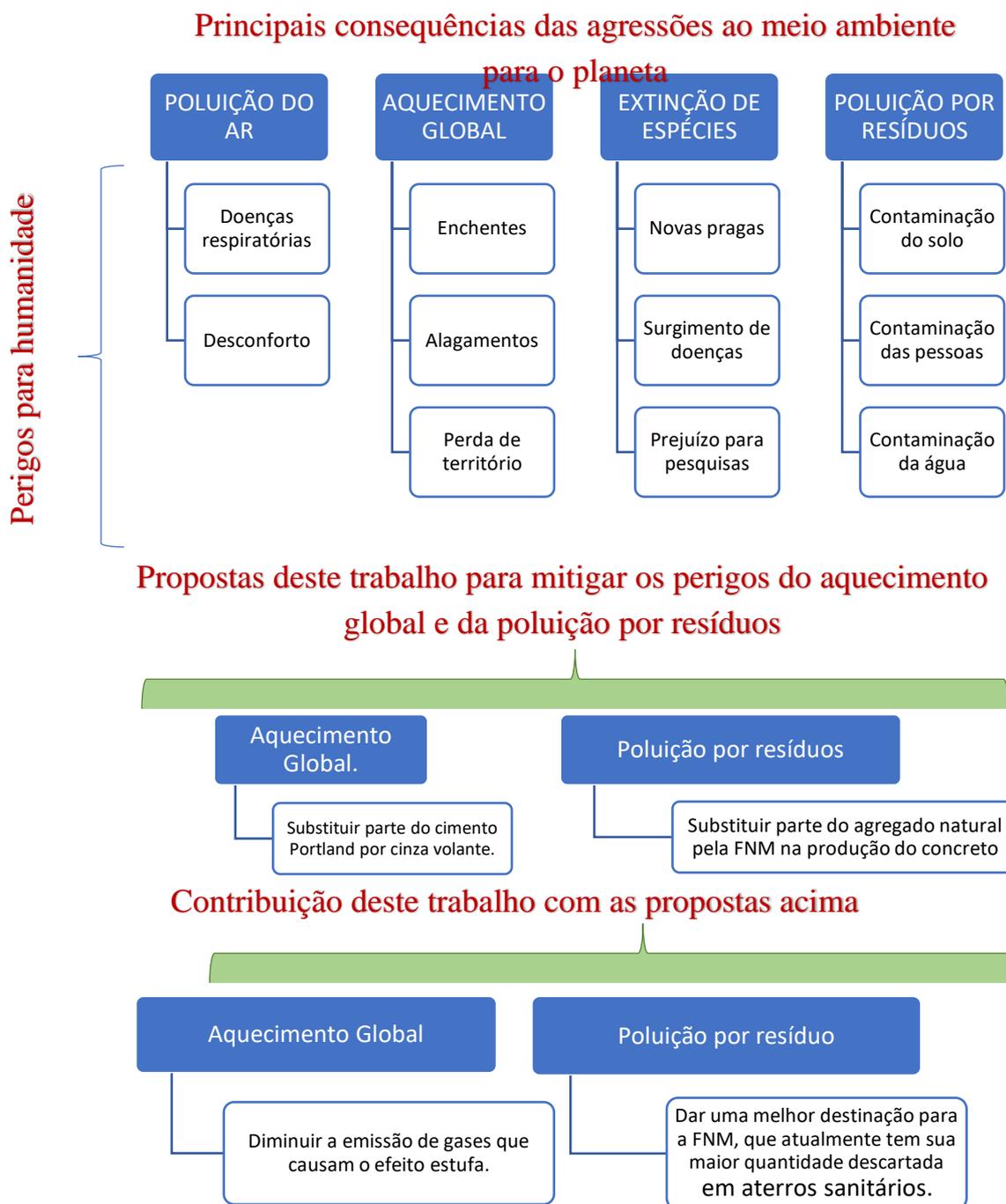
O Capítulo 3 é destinado à descrição do Planejamento Experimental, onde foi utilizado o método de experimento com misturas, de forma a demonstrar que o mesmo conduz a uma pesquisa válida e fidedigna.

No Capítulo 4 são mostrados os resultados e aplicações. Nesse capítulo são analisados os resultados dos ensaios e dos tratamentos estatísticos. Após essas análises são sugeridas aplicações para o concreto produzido com a utilização da FNMs como substituto de parte dos agregados naturais. Também são feitas sugestões para o concreto, que além de ser produzido

com a substituição de parte dos agregados naturais pela FNMs, são produzidos com a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante.

Finalmente, no Capítulo 5 estão as conclusões deste presente trabalho.

A Figura 1.26 esquematiza a problemática do DS identificada por este presente trabalho. Também mostra as sugestões para auxiliar na solução dos problemas do aquecimento global e destinação de resíduos.



**Figura 1.26:** Esquematização da problemática e propostas deste presente trabalho

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 *E-waste* ou Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

#### 2.1.1 Definição

O resíduo eletrônico foi denominado *e-waste* ou Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos – (REEE) (*WEEE* na sigla em inglês) pela Diretiva da União Europeia 2002/96/EC (Europeu, 2003). O *e-waste* é definido como todo e qualquer resíduo composto por qualquer parte dos equipamentos citados na diretiva 2002/96/EC (BUI, SATOMI e TAKAHASHI, 2017), ou como todo produto eletrônico em fim de vida (ex.: computadores, impressoras, fotocopiadoras, aparelhos de TV, celulares e brinquedos) e que são feitos de misturas sofisticadas de plásticos, metais entre outros materiais (LI *et al.*, 2013). Em outras palavras, *e-waste* são resíduos constituídos de todos os dispositivos elétricos ou eletrônicos inutilizados ou simplesmente obsoletos (KEUNG WONG, LI e SONG, 2007).

#### 2.1.2 Revisão de literatura sobre o *e-waste*

A gestão de resíduos sólidos representa um desafio muito grande, tanto para os países desenvolvidos, como para aqueles em desenvolvimento. Esses desafios são causados pela grande geração desses resíduos. Dentre os principais fatores que contribuem para o incremento na geração de resíduos sólidos, este presente trabalho destaca: o crescimento industrial, urbanização rápida e estilo de vida consumista (LIEW, SOJOBI e ZHANG, 2017). Esses fatores, juntamente com uma vida curta dos Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) devido às inovações tecnológicas e ao desenvolvimento econômico (IKHLAYEL, 2018), também contribuem para o incremento na produção de EEE em todo o mundo.

Uma das consequências do aumento da produção de EEE é que o Resíduo de Equipamento Elétricos e Eletrônicos (REEE), ou simplesmente *e-waste*, se tornou o tipo de resíduo sólido com a maior taxa de incremento na sua geração (CUCCHIELLA *et al.*, 2016). Estima-se que as taxas de crescimento anual na geração desse tipo de resíduo variam de 3% a 5% ao ano (CUCCHIELLA *et al.*, 2015). Essas taxas são cerca de três vezes superiores às de outros tipos de resíduos (KUMAR, HOLUSZKO E ESPINOSA, 2017b). Em 2018, a Organização das Nações Unidas (ONU) estimou em 50 milhões de toneladas de lixo eletrônico gerado em todo o mundo (LUHAR e LUHAR, 2019). Esses incrementos na geração de *e-waste* ocorrem, principalmente, em países industrializados, como os EUA, países da Europa e Coréia do Sul (MAN, NAIDU e WONG, 2013). Mas também ocorrem em alguns países em

desenvolvimento, como o Brasil e a China, que é hoje o maior produtor, e consumidor, de produtos eletrônicos do mundo (TONG *et al.*, 2018). Nos EUA, por exemplo, só a quantidade de descartes de computadores pessoais (PC) obsoletos em 2005 produziu uma média de 806.700 toneladas de *e-waste* (WANG *et al.*, 2017).

Em consequência do incremento na geração do *e-waste* surgem as dificuldades para dar uma destinação correta para esse tipo de resíduo. Estas dificuldades se dão, principalmente, por causa do *e-waste* ser um resíduo muito difícil de degradar (PANIZZON, REICHERT E SCHNEIDER, 2017). O processo de coleta também contribui para dificultar a destinação correta do *e-waste*. A revisão de literatura realizada por este presente trabalho obteve a percepção de que o processo de coleta é muito deficitário. Identificou-se que apenas uma pequena parte do *e-waste* é coletada e processada através de operações comerciais em larga escala. Ainda assim, essas operações comerciais priorizam a recuperação de metais preciosos, tendo foco na recuperação de PCI (ORLINS e GUAN, 2016). O reflexo dessas dificuldades é a pequena quantidade de lixo eletrônico que é totalmente reciclada. Estima-se que, mundialmente, a taxa de reciclagem varia de 15% a 20% (KUMAR, HOLUSZKO E ESPINOSA, 2017b), enquanto o restante é descartado de forma incorreta, sendo quase sempre incinerado ou depositado em aterros (LUHAR e LUHAR, 2019). Mesmo nessa pequena porção de lixo eletrônico que é reciclado, existem alguns problemas. Por exemplo, o processo de recuperação de metais preciosos traz benefícios econômicos para a indústria. No entanto, não é possível ignorar a existência de produtos químicos perigosos no lixo eletrônico. E nem sempre as empresas que fazem esse tipo de recuperação garantem que o processo seja adequado e ambientalmente seguro (KUMAR, HOLUSZKO e ESPINOSA, 2017b). Essas práticas podem levar à exposição, direta ou indireta, a uma variedade de substâncias perigosas que estão neste tipo de resíduo (N. PERKINS *et al.*, 2014).

Também foi identificado que, ao mesmo tempo que o *e-waste* doméstico representa a maior proporção de *e-waste* gerado, é nesse seguimento que se encontram as maiores dificuldades no processo de coleta (SUN *et al.*, 2015). Dificuldades como aponta o estudo de QU *et al.* (2013). Nesse estudo é mostrado que na cidade de *Dalian*, na China, os resíduos eletrônicos domésticos ou são vendidos como produtos de segunda mão, ou são submetidos a processos de incineração a céu aberto para recuperar materiais preciosos. Processos esses que acabam degradando o meio ambiente e expondo trabalhadores a toxinas e metais pesados (LIU *et al.*, 2007).

Essas dificuldades, no tratamento do *e-waste*, são mais acentuadas nos países em desenvolvimento. Esses países estão enfrentando enormes desafios na gestão do *e-waste*, tanto

no que é gerado internamente, quanto no que é importado ilegalmente dos países desenvolvidos. Para exportar ilegalmente o *e-waste*, os países desenvolvidos usam o fraco argumento de “eliminar a exclusão digital” dos países em desenvolvimento, exportando “bens usados” para os mesmos (NNOROM e OSIBANJO, 2008).

Um exemplo de país em desenvolvimento que tem dificuldade na gestão do seu *e-waste* é a China. Nesse país há relatos de haver atividades não controladas de reciclagem de *e-waste* em várias de suas localidades (LUO *et al.*, 2011). Mesmo sendo a segunda maior produtora de *e-waste* do mundo, não consegue tratar grande parte de seus resíduos de forma científica. O resultado é que grande parte desse resíduo, composto por metais pesados, permanece de forma inadequada em contato com o meio ambiente (WANG, GUO e WANG, 2016). Outra grande parte é recuperado e vendido como bens de segunda mão, como mostrou um estudo realizado por TONG *et al.* (2018), onde se constatou que mais de 50% dos resíduos coletados em Pequim foram reparados e comercializados como produtos de segunda mão.

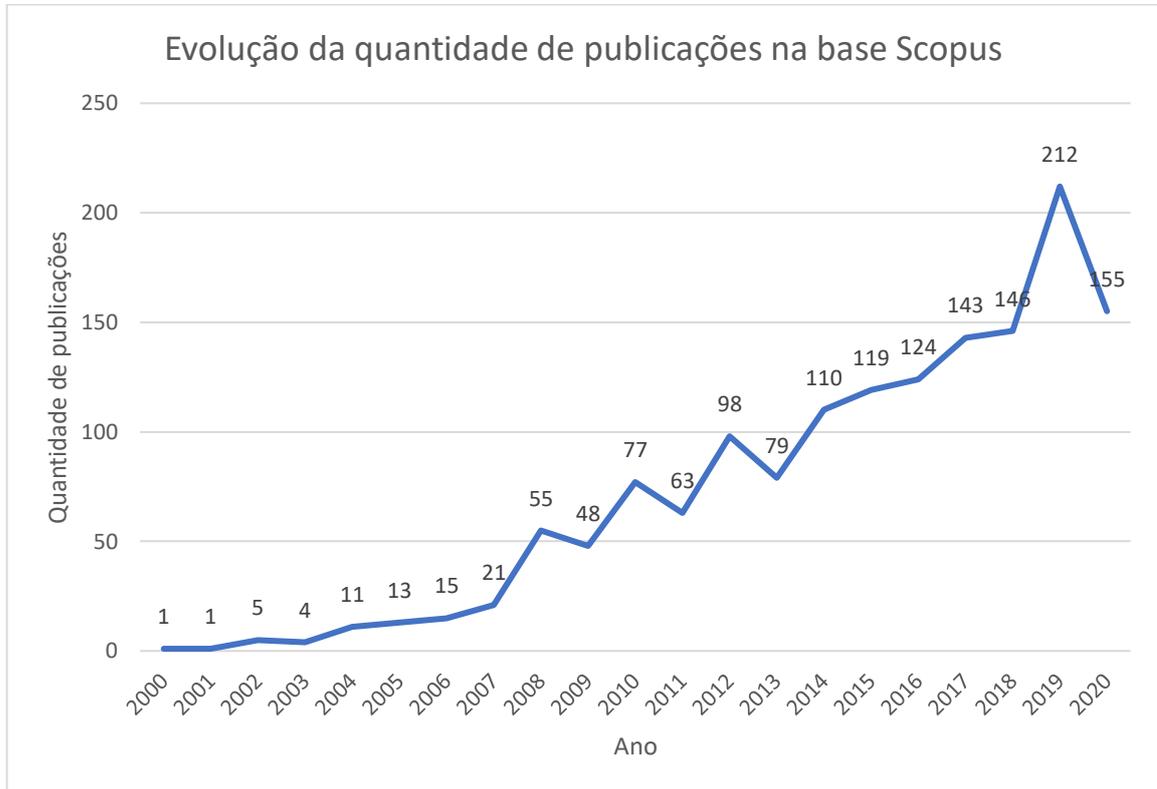


**Figura 2.1:** Evolução da quantidade de publicações, com a palavra “*e-waste*” no título. Os dados de 2020 são referentes até o dia 23 de julho de 2020

Fonte: *Web of Science* (2020)

No intuito de verificar como a questão do *e-waste* vem sendo tratada pela comunidade acadêmica, este presente trabalho analisou o número de artigos publicados com a palavra “*e-waste*” no título, nas bases *Web Of Science* e *Scopus*. Nessa investigação constatou-se que os artigos com essa característica estavam com o número de publicações estáveis até o ano de 2005, na primeira base, e até o ano de 2003 na segunda, como pode ser visto nos gráficos das Figuras 2.1 e 2.2. É possível verificar nas mesmas figuras que, a partir de então, a quantidade de publicações com a palavra “*e-waste*” no título tem tendência de crescimento. Também pode-se verificar que a quantidade de publicações ultrapassou 100 publicações anuais, de 2014 em

diante nas duas bases. Esses dados levam este presente trabalho a inferir que a questão do *e-waste* vem cada vez mais chamando a atenção da sociedade em todo o mundo.



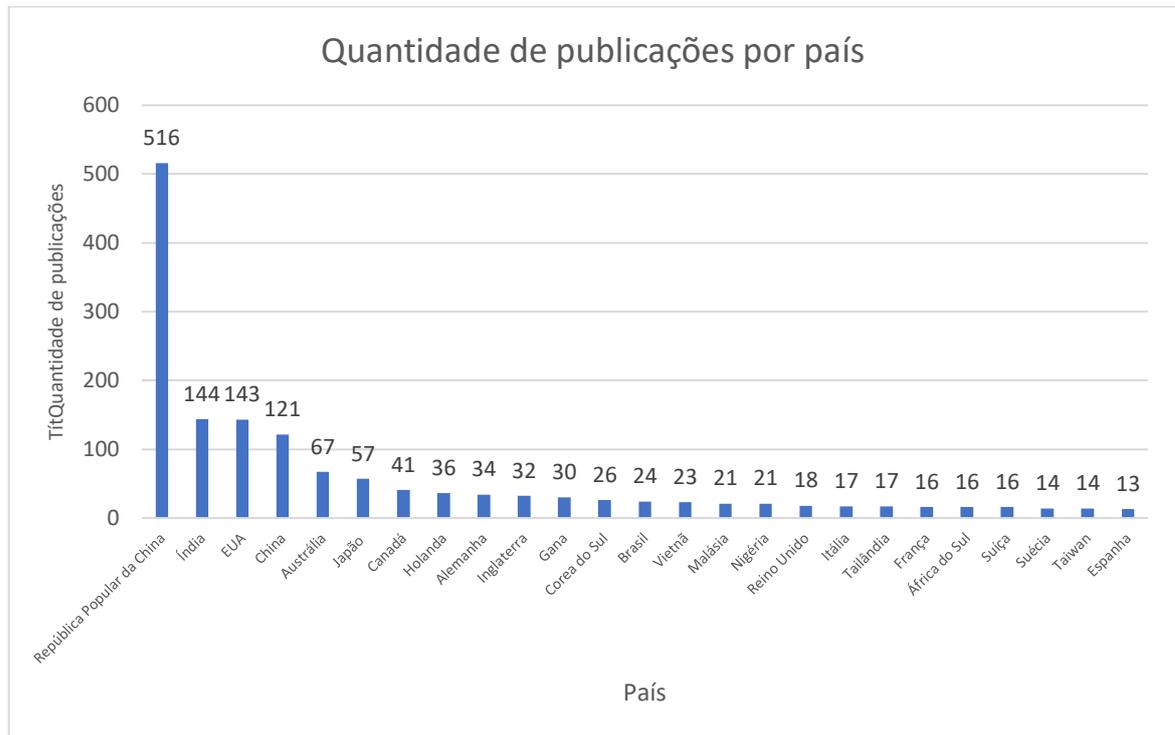
**Figura 2.2:** Evolução da quantidade de publicações, com a palavra “*e-waste*” no título. Os dados de 2020 são referentes até o dia 23 de julho de 2020

Fonte: *Scopus* (2020)

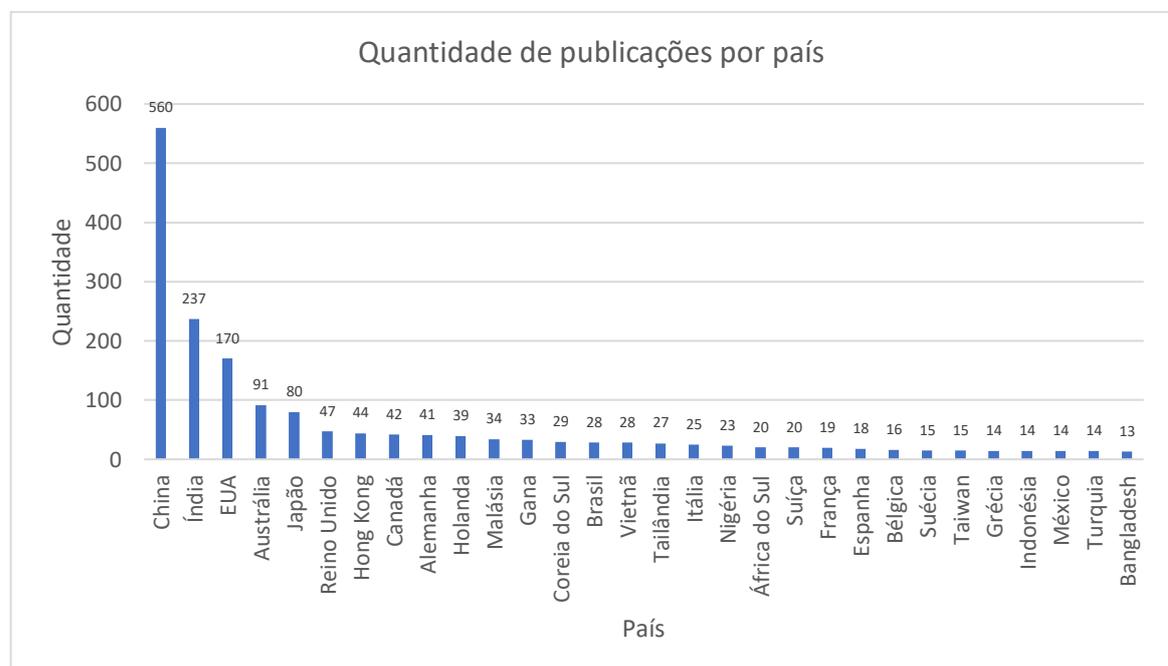
Este presente trabalho também analisou a distribuição dos artigos, citados anteriormente, por país. O resultado está nas Figuras 2.3 e 2.4 e mostra que, em ambas as bases, a China, a Índia e os EUA são os países que mais publicam sobre o tema *e-waste*. O Brasil ficou numa discreta posição de décimo terceiro, na base *Web of Science*, e na décima quarta na base *Scopus*, mostrando a necessidade de o país investir mais em pesquisas na área de tratamento de *e-waste* pois, apesar de ser um grande gerador de *e-waste*, em número de publicações sobre o tema fica atrás de países com bem menos recursos financeiros, como Gana.

Além de realizar uma análise quantitativa, verificando a evolução do número de artigos publicados com a palavra “*e-waste*” no título, e sua distribuição por país, este presente trabalho também realizou uma análise qualitativa. Para isso, foram selecionados os 20 artigos mais citados de cada base, além dos dez mais recentes, também das duas bases, que continham a palavra “*e-waste*” no título. O resultado dessa análise está sintetizado no Quadro 2.1. Também

foi confeccionado, usando os dados do Quadro 2.1, o gráfico da Figura 2.5 que apresenta a distribuição dos artigos selecionados em relação ao método de pesquisa empregado nos estudos.



**Figura 2.3:** Quantidade de publicações, com a palavra “e-waste” no título, na base *Web of Science*, dos vinte e cinco países que mais publicaram. Os dados de 2020 são referentes até o dia 23 de julho de 2020  
Fonte: *Web of Science* (2020)



**Figura 2.4:** Quantidade de publicações, com a palavra “e-waste” no título, dos 30 países que mais publicaram. Os dados de 2020 são referentes até o dia 23 de julho de 2020  
Fonte: *Scopus* (2020)

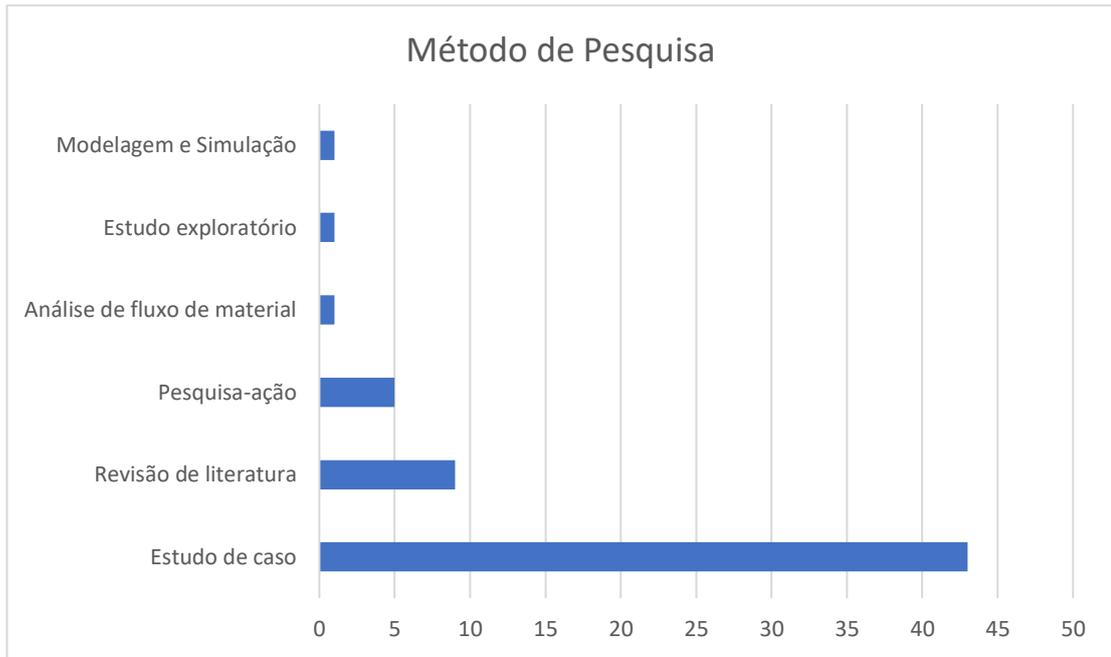
**Quadro 2.1:** Principais informações dos sessenta artigos, cujo título continha a palavra “*e-waste*”.

Referência	Base	Nº de citações	Objetivo do trabalho	Método de pesquisa	Tipo de tratamento proposto
(WIDMER <i>et al.</i> , 2005)	Scopus	689	Analisar os obstáculos existentes para a gestão de <i>e-waste</i> , principalmente em países desenvolvidos.	Revisão de literatura	Nenhum
(ROBINSON, 2009)	Scopus	617	Avaliar a produção global de <i>e-waste</i> , contaminantes e os fluxos de contaminantes associados ao <i>e-waste</i> e seus prováveis impactos no meio ambiente	Revisão de literatura	Nenhum
(WIDMER <i>et al.</i> , 2005)	ISI	580	Analisar a evolução da geração e o gerenciamento do <i>e-waste</i>	Revisão de literatura	Nenhum
(FU <i>et al.</i> , 2008)	Scopus	294	Investigar o nível de contaminação do arroz, causado pelo <i>e-waste</i> , em um local onde há atividades recicladoras na China	Estudo de caso	Nenhum
(LUO <i>et al.</i> , 2011)	Scopus	258	Investigar a contaminação do solo e dos vegetais, causado por <i>e-waste</i> , perto de um local de processamento de <i>e-waste</i> no sul da China	Estudo de caso	Nenhum
(FU <i>et al.</i> , 2008)	ISI	256	Analisar a presença de metais pesados em amostras de arroz dessa região.	Estudo de caso	Nenhum
(LEUNG <i>et al.</i> , 2008)	Scopus	276	Determinar as concentrações e distribuição espacial de sete metais pesados (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) em pó de superfície em um distrito de reciclagem de placas de circuito impresso, em oficinas e locais públicos próximos.	Estudo de caso	Nenhum
(LEUNG <i>et al.</i> , 2008)	ISI	246	Investigar as consequências, para a saúde humana e para o ambiente, devido a reciclagem descontrolada em <i>Guiyu</i> , China	Estudo de caso	Nenhum
(LUO <i>et al.</i> , 2011)	ISI	246	Investigar a contaminação, por metais pesados, solos e vegetais perto de um local de processamento de <i>e-waste</i> na China.	Estudo de caso	Nenhum
(WU, J.-P. <i>et al.</i> , 2008)	ISI	230	Investigar os níveis e extensão da bioacumulação de éteres difenil-polibromados e Bifenilos policlorados, liberados a partir da reciclagem de <i>e-waste</i> .	Estudo de caso	Nenhum
(NNOROM e OSIBANJO, 2008)	Scopus	228	Revisar o conceito de Responsabilidade estendida ao consumidor e verificar sua aplicação em países em desenvolvimento	Revisão de literatura	Nenhum
(WONG, WU, <i>et al.</i> , 2007)	Scopus	201	Analisar a contaminação por traços de sedimentos, em um local que trabalha com <i>e-waste</i> , numa cidade da China.	Estudo de caso	Nenhum
(WU, J. P. <i>et al.</i> , 2008)	Scopus	191	Investigar os níveis de <i>Polybrominated diphenyl ethers</i> (PBDEs) e <i>polychlorinated biphenyls</i> (PCBs) na água e, também, em várias espécies aquáticas de um local de reciclagem de <i>e-waste</i> na China.	Estudo de caso	Nenhum
(KAHHAT <i>et al.</i> , 2008)	Scopus	180	Propor um novo modelo no gerenciamento de <i>e-waste</i> nos EUA.	Pesquisa-ação	Nenhum
(WONG <i>et al.</i> , 2007a)	ISI	175	Analisar a contaminação, por metais de sedimentos, em uma vila de processamento de <i>e-waste</i> na China.	Estudo de caso	Nenhum
(ZHENG <i>et al.</i> , 2008)	ISI	173	Mensurar os efeitos das atividades de reciclagem de <i>e-waste</i> na saúde das crianças na China.	Estudo de caso, utilizando uma <i>Survey</i>	Nenhum
(WONG, DUZGOREN, AYDIN, <i>et al.</i> , 2007)	ISI	172	Analisar o nível de contaminação da água por metais, causado pelo <i>e-waste</i> na China.	Estudo de Caso	Nenhum

(ZHENG <i>et al.</i> , 2008)	Scopus	169	Investigar o nível de chumbo e cádmio no sangue das crianças de uma cidade que trabalha com reciclagem de <i>e-waste</i> na China	Estudo de caso	Nenhum
(WONG, DUZGORE N-AYDIN, <i>et al.</i> , 2007)	Scopus	167	Investigar as possíveis consequências ambientais decorrentes de atividades de reciclagem de <i>e-waste</i> numa localidade da China	Estudo de caso	Nenhum
(LUO, Y. <i>et al.</i> , 2009)	Scopus	162	Analisar os solos perto das oficinas de desmantelamento de <i>e-waste</i> , em uma região do sul da China.	Estudo de caso	Nenhum
(TANG <i>et al.</i> , 2010)	Scopus	155	Investigar os níveis, e fonte, de metais pesados e compostos orgânicos persistentes em solos retirados de uma cidade que trabalha com reciclagem de <i>e-waste</i> na China.	Estudo de caso	Nenhum
(LUO, Y. <i>et al.</i> , 2009)	ISI	151	Determinar os perfis do éteres difenílicos polibromados presentes em solos rodoviário e agrícolas num centro urbano chinês, que abriga mais de 1300 oficinas de reciclagem de <i>e-waste</i> .	Estudo de caso	Nenhum
(TANG <i>et al.</i> , 2010)	ISI	149	Investigar os níveis, e também as fontes, de metais pesados e compostos orgânicos persistentes em solos de uma cidade que trabalha com reciclagem de <i>e-waste</i> na China.	Estudo de caso	Nenhum
(CHEN <i>et al.</i> , 2009)	ISI	146	Analisar a variação de éteres difenílicos polibromados na atmosfera de região de desmantelamento de <i>e-waste</i> na China.	Estudo de caso	Nenhum
(ZHAO <i>et al.</i> , 2008)	Scopus	142	Investigar os efeitos da exposição de residentes chineses a PBBs e PCBs em um local de desmontagem de <i>e-waste</i> na China	Estudo de caso	Nenhum
(LUO, X. <i>et al.</i> , 2009)	ISI	141	Analisar a quantidade de compostos halogenados persistentes presentes nos músculos de cinco espécies de aves aquáticas em uma região que trabalha com reciclagem de <i>e-waste</i> , no sul da China.	Estudo de caso	Nenhum
(KHETRIWAL, KRAEUCHI e WIDMER, 2009)	Scopus	137	Analisar a implantação da responsabilidade estendida do produtor como ferramenta na gestão do <i>e-waste</i> .	Revisão de literatura	Nenhum
(CUCCHIELLA <i>et al.</i> , 2015)	Scopus	134	Avaliar, economicamente, os fluxos de <i>e-waste</i> , tanto no presente, como no futuro.	Revisão de literatura	Nenhum
(CHEN <i>et al.</i> , 2009)	Scopus	130	Analisar o nível de contaminação, por PBDEs na atmosfera de uma região que trabalha com reciclagem de <i>e-waste</i> , no sul da China.	Estudo de caso	Nenhum
(ZHAO <i>et al.</i> , 2008)	ISI	130	Analisar o nível de exposição, dos residentes de uma região que trabalha com desmontagem de <i>e-waste</i> , no sul da China, a bifenilto polibromado, éteres difenílicos polibromados e bifenilos policlorados.	Estudo de caso	Nenhum
(STHIANNOPKAO e WONG, 2013)	Scopus	127	Analisar como os países desenvolvidos e, também, os em desenvolvimento, lidam com a questão do <i>e-waste</i> .	Revisão de literatura	Nenhum
(LUO, X. <i>et al.</i> , 2009)	Scopus	127	Investigar os níveis e fontes de compostos halogenados persistentes em aves num local, no sul da China.	Estudo de caso	Nenhum
(SHEN <i>et al.</i> , 2009)	Scopus	121	Caracterizar, utilizando análises químicas, os compostos semelhantes à dioxina em	Estudo de caso	Nenhum

			uma área de reciclagem de <i>e-waste</i> na China.		
(STHIANN OPKAO e WONG, 2013)	ISI	120	Caracterizar a situação do lixo eletrônico, principalmente em relação a destinação do mesmo.	Revisão de literatura	Nenhum
(SHEN <i>et al.</i> , 2009)	ISI	117	Caracterizar dioxinas e substâncias químicas relacionadas, em solos agrícolas em torno de locais de reciclagem de <i>e-waste</i> da área de <i>Taizhou</i> , na China.	Estudo de caso	Nenhum
(KHETRIWAL, KRAEUCH I e WIDMER, 2009)	ISI	117	Apresentar, brevemente, o conceito de responsabilidade estendida do produtor (REP) e sua aplicabilidade na área de gerenciamento de equipamentos elétricos e eletrônicos em fim da vida útil.	Revisão de literatura	Nenhum
(WANG <i>et al.</i> , 2010)	ISI	117	Investigar a concentração e composição de Retardadores de chama bromados (RCBs), além de seus comportamentos ambientais, em poeira doméstica presente em uma área de reciclagem de <i>e-waste</i> em uma área urbana no sul da China.	Estudo de caso	Nenhum
(STREICHER-PORTE <i>et al.</i> , 2005)	ISI	109	Utilizando o método de Análise de Fluxo de Material (AFM), avaliar a gestão da reciclagem de equipamentos elétricos e eletrônicos na cidade de <i>Delhi</i> , na Índia.	Análise de fluxo de material	Nenhum
(ZHANG, SCHNOOR e ZENG, 2012)	ISI	105	Usando a China como estudo de caso, analisar as implicações ambientais, econômicas e sociais da reciclagem de lixo eletrônico no mundo em desenvolvimento.	Estudo de caso	Nenhum
(LIU <i>et al.</i> , 2008)	ISI	99	Estudar a contaminação, por Éteres difenílicos polibromados (EDPs), Bifenilos policlorados (BPs) e dibenzo-p-dioxinas policloradas e dibenzo-furanos (DDP/DFs), em uma área que trabalha com a reciclagem de <i>e-waste</i> no sul da China.	Estudo de caso	Nenhum
		Ordem cronológica			
(LIU <i>et al.</i> , 2018)	ISI	1	Investigar os padrões de acumulação de poluentes orgânicos halogenados (POHs) entre animais selvagens com diferentes habitats e examinar a transferência materna de POHs em espécies ovovíparas, numa região que trabalha com <i>e-waste</i> , no sul da China.	Estudo de caso	Nenhum
(WU, W. <i>et al.</i> , 2018)	ISI	2	Investigar as concentrações, distribuições espaciais e risco potencial de As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn em campos agrícolas de uma região típica de reciclagem de <i>e-waste</i> , no sul da China.	Estudo de caso	Nenhum
(HUANG <i>et al.</i> , 2018)	ISI	3	Analisar as concentrações de retardadores de chama halogenados em ovos de galinha, produzidos em casa da aldeia de <i>Baihe</i> , em <i>LongTANG</i> e comparar com os resultados dos trabalhos, realizados em 2010, pelos mesmos autores.	Estudo de caso	Nenhum
(KUMAR, GAIKWAD e SAHAJWALLA, 2018)	ISI	4	Investigar o uso de resíduos de toner e de pó de cartuchos de toner e copolímero de acrilonitrila de estireno em fim de vida de impressoras, como fontes de óxido de ferro e carbono, respectivamente.	Pesquisa-ação	Utilizar esse tipo de resíduo como matéria prima secundária na fabricação de ferro.

(JIANG <i>et al.</i> , 2018)	ISI	5	Empregando o método independente de cultura de sondagem de isótopos estáveis de DNA, investigar degradadores ativos de bifênil e Bifenilos Policlorados (BPs) em solos contaminados com <i>e-waste</i> .	Pesquisa-ação	Nenhum
(BHASKA R e TURAGA, 2017)	ISI	6	Realizar uma revisão de literatura sobre a utilização da Responsabilidade Ampliada do Produtor (RAP) nos países em desenvolvimento, dando um enfoque na gestão do <i>e-waste</i> .	Estudo exploratório	Nenhum
(XU <i>et al.</i> , 2018)	ISI	7	Investigar, em três aldeias de <i>Guiyu</i> , na China, a influência da exposição ao chumbo (Pb), cádmio (Cd) e mercúrio (Hg) em 8-hidroxidesoxiguanosina (8-OhdG) e enzima de reparação humana 8-oxoguanina DNA glicosilase (hOGG1) em crianças, de três a seis anos, que vivem próximas aos locais de reciclagem de <i>e-waste</i> , nessas aldeias.	Estudo de caso	Nenhum
(TONG <i>et al.</i> , 2018)	ISI	8	Usando modelos de interação espacial, quantificar os fluxos espaciais de <i>e-waste</i> , que estão sendo desviados para o sistema de reciclagem formal na China, através das redes de coleta informais, sob a intervenção do governo.	Modelagem e simulação	Nenhum
(JEON <i>et al.</i> , 2018)	ISI	9	Descrever a recuperação de ouro (Au) da fração leve triturada (FLT) de uma usina de reciclagem por flotação e lixiviação.	Estudo de caso	Nenhum
(ZENG <i>et al.</i> , 2018)	ISI	10	Avaliar os efeitos da exposição ao chumbo, sobre os índices de plaquetas no sangue de crianças, que vivem em uma área típica de reciclagem de <i>e-waste</i> , na China	Estudo de caso	Nenhum
(WU <i>et al.</i> , 2019)	Scopus	1	Avaliar a tendência, temporal, das concentrações de PCBs, nos anos de 2010, 2012 e 2016, em um local após o encerramento de atividades envolvendo <i>e-waste</i> na China	Estudo de caso	Nenhum
(POMA <i>et al.</i> , 2019)	Scopus	2	Investigar a ocorrência de contaminação, por retardadores, de chama bromados, de insetos selvagens de um antigo local de reciclagem de <i>e-waste</i> na China	Estudo de caso	Nenhum
(XU <i>et al.</i> , 2019)	Scopus	3	Estudar o nível de contaminação e as distribuições espaciais de parafinas cloradas, em uma área de desmantelamento de <i>e-waste</i> e na sua vizinhança.	Estudo de caso	Nenhum
(JIANG <i>et al.</i> , 2019)	Scopus	4	Investigar os níveis de contaminação, por metais pesados, e seus efeitos na estrutura e diversidade da comunidade bacteriana em um local que trabalha com <i>e-waste</i> na Nigéria.	Estudo de caso	Nenhum
(ZHAO <i>et al.</i> , 2019)	Scopus	5	Analisar o impacto das oficinas de desmantelamento de insumo e <i>e-waste</i> em grandes rios.	Estudo de caso	Nenhum
(LI <i>et al.</i> , 2019)	Scopus	6	Analisar o nível de contaminação por retardadores de chamas em um rio de uma região que trabalha com <i>e-waste</i> na China.	Estudo de caso	Nenhum
(OTTO <i>et al.</i> , 2018)	Scopus	7	Investigar o papel do custo comportamental na reciclagem de <i>e-waste</i> .	Pesquisa-ação	Nenhum
(CHEN, Y. <i>et al.</i> , 2018)	Scopus	8	Avaliar os impactos, no ecossistema e na saúde pública, das regulamentações sobre o <i>e-waste</i> .	Estudo de caso	Nenhum
(CHEN, M. <i>et al.</i> , 2018)	Scopus	9	Analisar o sistema de gerenciamento de <i>e-waste</i> chinês.	Estudo de caso	Nenhum
(WU, Z. <i>et al.</i> , 2018)	Scopus	10	Investigar a biodegradação de éter decabromodifenílico por uma bactéria recém isolada de uma área de reciclagem de <i>e-waste</i> na China.	Pesquisa-ação	Nenhum



**Figura 2.5:** Distribuição, por metodologia de pesquisa, dos 60 artigos analisados neste presente trabalho

Verificando o gráfico da Figura 2.5 é possível notar que a maioria dos artigos são estudos de caso, com mais de dois terços do total de publicações do Quadro 2.1. Em seguida vem a revisão de literatura, com nove artigos, pesquisa-ação, com cinco artigos e, finalmente, análise de fluxo de material, estudo exploratório e modelagem e simulação, todos com um artigo cada. Também merece destaque a quantidade de artigos com origem na China. Novamente, a China é o país com o maior número de artigos do Quadro 2.1, ou seja, entre os artigos mais relevantes, e mais recentes, das bases pesquisadas, cujo título contém a palavra “*e-waste*”.

Talvez a informação mais relevante, que pode ser extraída do Quadro 2.1 é que entre todos os artigos analisados, apenas um propõe um destino para o *e-waste*. Esse artigo sugere a utilização do *e-waste* como matéria prima, secundária, na fabricação de ferro. Os demais não propõem nenhum tipo de destinação para o *e-waste*, limitando-se a fazer um diagnóstico da situação de locais que trabalham com o *e-waste*, mostrando as consequências negativas para o homem e o meio ambiente, da destinação inadequada do *e-waste* e, alguns, sugerem melhora na gestão do *e-waste*, usando fluxo de material e modelagem e simulação, mas sem indicar um tratamento específico para o *e-waste*. Com essas informações, o presente trabalho avalia que, apesar da questão do *e-waste* ser muito debatida pela sociedade e pela comunidade científica, com uma quantidade crescente de trabalhos sobre o tema, o número de estudos que propõem uma destinação do *e-waste*, ambientalmente eficiente, ainda é muito pequeno.

Outra informação importante que o Quadro 2.1 fornece é que, tanto entre os 20 artigos mais relevantes de cada base, como entre os 10 mais recentes, também de ambas as bases, não

há nenhum trabalho de autor brasileiro, reforçando a necessidade de investimento em pesquisas nessa área no Brasil.

Além dos achados do Quadro 2.1, o presente trabalho identificou uma mudança no comportamento dos países desenvolvidos em relação a política de exportar seu *e-waste*, a partir do ano de 2009. Antes deste ano os países simplesmente exportavam seu *e-waste* para países pobres, onde poderia ser reciclado usando técnicas primitivas e pouca consideração pela segurança do trabalhador. Os principais motivos para essa política eram a falta de instalações, alto custos trabalhistas e rígidas regulamentações ambientais nos países desenvolvidos (ROBINSON, 2009). Após 2009 os países desenvolvidos passaram a coletar o *e-waste*, com o objetivo de recuperar os materiais de valor, mas também com o objetivo de destinar corretamente e com segurança, os materiais que podem causar danos ao ambiente. Nos países em desenvolvimento o objetivo ainda é, quase que exclusivamente, o de recuperar metais preciosos (STHIANNOPKAO e WONG, 2013).

Essa situação pode ser percebida ao analisar as pesquisas sobre o *e-waste* identificadas na revisão de literatura deste presente trabalho. Nessas pesquisas, entre as que propunham alguma destinação para o *e-waste*, não foram identificadas, na grande maioria, propostas de destinação correta do resíduo, que elimine completamente os danos ambientais, principalmente em países em desenvolvimento. Um exemplo de tratamento que não proporciona uma destinação correta dos resíduos são os processos para extrair metais preciosos na China, que utilizam a lixiviação ácida e a queima aberta de componentes desmontados, que levam à liberação de grandes quantidades de gases tóxicos e poluentes orgânicos ao meio ambiente (LUO *et al.*, 2011). Embora esses tipos de processos tenham a admirável intensão de recuperar partes reutilizáveis do *e-waste*, muitas vezes esses processos são realizados de maneira primitiva e com poucas medidas de controle da poluição gerada pelos processos de reciclagem (WONG, WU, *et al.*, 2007). Assim, a percepção é de que a questão da reciclagem, em países em desenvolvimento como a China e o Brasil, ainda está pautada pela questão financeira. Corroboram para essa percepção, trabalhos como o de ORLINS e GUAN (2017), que ao analisarem as barreiras para a coleta do *e-waste* doméstico por empresas autorizadas na China, verificaram que o foco dessas empresas recicladoras autorizadas era a recuperação de metais raros, ficando a questão ambiental em segundo plano.

Por ser pautada mais pela questão financeira do que a ambiental, grande parte dos tratamentos dados ao *e-waste*, principalmente em países em desenvolvimento, acabam degradando o meio ambiente, como a incineração e o depósito em aterros sanitários (SHUVA *et al.*, 2016). Esses processos causam a contaminação da água, do ar e do solo, além de efeitos

danosos na saúde causados pelos metais pesados e poluentes persistentes (KIDDEE, NAIDU e WONG, 2013).

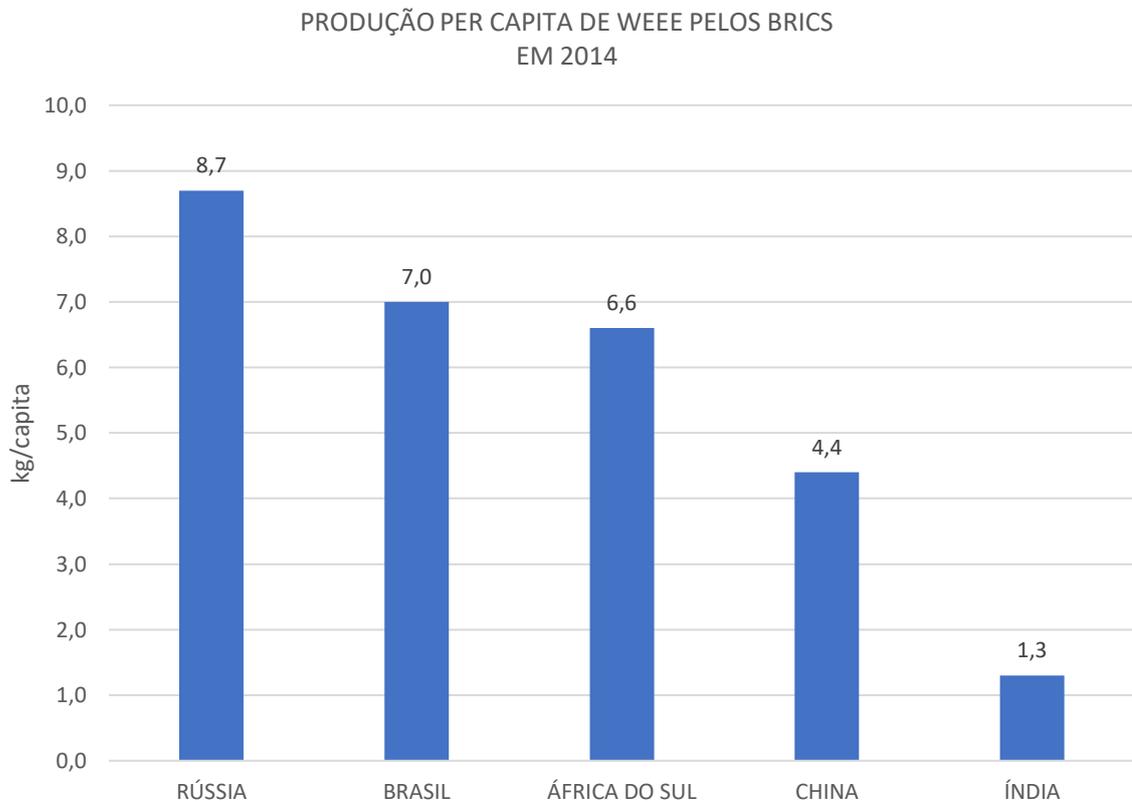
Em relação às legislações ambientais, a revisão de literatura verificou que, a partir dos anos 1990, houve um aumento no número de políticas e legislações ambientais com objetivos de reduzir os problemas causados pelos resíduos (NNOROM e OSIBANJO, 2008). Um exemplo é a política que disciplina a coleta, a recuperação e o desmantelamento de *e-waste*, aplicada pela Comissão Europeia. O objetivo dessa política é limitar e controlar os fluxos desses resíduos dos países pertencentes à União Europeia para países não pertencentes à União Europeia (CUCCHIELLA *et al.*, 2015). Outros exemplos são as leis de reciclagem de eletrodomésticos, implantadas pelo Japão desde 2001 (STHIANNOPKAO e WONG, 2013) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) brasileiro, que foi a primeira regulamentação mundial a reconhecer a importância das organizações de catadores nos fluxos de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) e estimular a integração destes trabalhadores nos futuros programas de Logística Reversa - LR (DEMAJOROVIC, AUGUSTO e SOUZA, 2016).

Também foi identificado que, apesar de todas as dificuldades já mencionadas, há bons exemplos de gerenciamento do *e-waste* a serem estudados. A Suíça, além de ser pioneira na legislação sobre a gestão do *e-waste* (QUEIRUGA, GONZÁLEZ BENITO e LANNELONGUE, 2012), é reconhecida por ter o sistema de gerenciamento de lixo eletrônico de maior sucesso no mundo (SILVEIRA e CHANG, 2010). Outro exemplo é a utilização do princípio da Responsabilidade Estendida do Produtor (REP), estratégia que vem aumentando as taxas de reciclagem nos locais onde foram implementadas (SILVEIRA e CHANG, 2010), uma vez que ao utilizar esse princípio, além de obrigar o produtor a utilizar o *ecodesign* nos projetos de desenvolvimento de produtos e adotar a logística reversa, os obriga também a investir em pesquisas de reciclagens de materiais (FRANCO e LANGE, 2011). Em decorrência desse princípio, quase todas as grandes lojas de varejo eletrônico nos Estados Unidos já lançaram algum tipo de iniciativa de reciclagem de telefones celulares e algumas delas oferecem opções diversificadas de coleta de lixo eletrônico (SILVEIRA e CHANG, 2010).

### **2.1.3 E-waste no Brasil**

Assim como na maioria dos países, a produção de *e-waste* vem aumentando muito rapidamente no Brasil, principalmente pelo incremento na venda dos produtos da indústria de eletroeletrônicos nos últimos anos (FEAM, 2009). Estima-se que em 2008 o país gerou 3,8 kg de *e-waste* per capita e, em 2012, esse valor saltou para 7 kg per capita (ZENG *et al.*, 2015). Se

analisarmos os países que compõem o grupo denominado BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), o Brasil só fica atrás da Rússia em produção per capita de lixo eletrônico, como mostra a Figura 2.6, ficando à frente até mesmo da China, que é uma das maiores produtoras de *e-waste* (SOUZA, DE *et al.*, 2016) e que, em 2005, já tinha produzido, aproximadamente, 2,5 milhões de toneladas de *e-waste* (SONG e LI, 2015).



**Figura 2.6:** Produção, per capita, de WEEE pelos países pertencentes ao grupo Brasil, Rússia, Índia e China (BRICS) em 2014  
Fonte: (AZEVEDO *et al.*, 2017)

A produção total de *e-waste*, no Brasil, em 2009 foi estimada em 679.000 toneladas (FEAM, 2009). Já para o ano de 2016, em um estudo de caso realizado no Brasil, LI *et al.* (2013) estimaram que a produção de *e-waste* gerada superou as 890.000 toneladas.

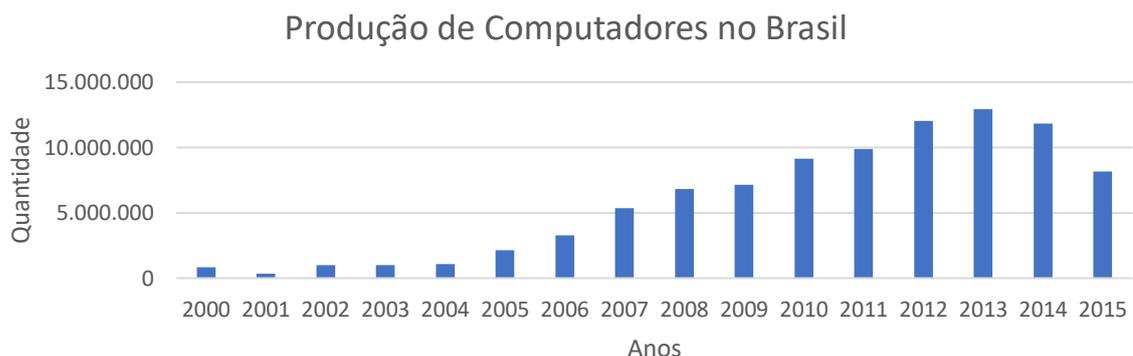
Um parâmetro importante na análise de produção de *e-waste* é a produção de computadores, dado que os computadores formam a maior parte dos resíduos eletrônicos (ROBINSON, 2009). Por isso, o presente trabalho analisou a produção de computadores no Brasil, desde o ano 2000 até o ano 2015. Esses dados foram tabulados na Tabela 2.1 e pode-se verificar que a produção saltou de pouco mais de 840 mil unidades em 2000, para mais de 4 milhões, já a partir do ano de 2010. Também é possível ver na Figura 2.7 que o pico da produção foi no ano de 2013, com uma produção de quase 13 milhões de unidades.

**Tabela 2.1:** Produção de computadores no Brasil

Ano	Quantidade	Crescimento em relação ao mês anterior	Crescimento acumulado
2000	846.878	0	0
2001	361.012	-0,57371	-0,57371
2002	1.014.451	1,81002	1,23631
2003	1.001.943	-0,01233	1,22398
2004	1.074.203	0,07212	1,29610
2005	2.155.719	1,00681	2,30291
2006	3.294.522	0,52827	2,83118
2007	5.356.899	0,62600	3,45718
2008	6.799.895	0,26937	3,72655
2009	7.159.339	0,05286	3,77941
2010	9.127.144	0,27486	4,05427
2011	9.868.402	0,08121	4,13549
2012	12.030.555	0,21910	4,35458
2013	12.926.108	0,07444	4,42902
2014	11.815.726	-0,08590	4,34312
2015	8.144.677	-0,31069	4,03243

Fonte: IBGE (2018)

Analisando a Figura 2.7 é possível verificar que a partir do ano de 2014 a produção de computadores no Brasil começa a regredir, caindo de quase 13 milhões, em 2013, para menos de 12 milhões em 2014, resultando em uma queda de mais de um milhão de unidades. Essa queda é mais acentuada em 2015, quando a produção ficou em torno de 8 milhões de unidades, uma queda de mais de 60% em relação ao ano de 2013, que foi o ano de pico de produção de computadores no Brasil, e uma queda de mais de 30% em relação ao ano anterior. Mas não se deve avaliar a tendência da evolução da produção de computadores no Brasil e, conseqüentemente, a tendência da evolução da geração de *e-waste*, utilizando apenas os dados sem realizar uma contextualização do momento econômico no Brasil. Sem essa contextualização, pode-se chegar a conclusão, equivocada, de que a tendência na evolução da produção de computadores no Brasil para o futuro é de decréscimo e que, por isso, a tendência da evolução da produção de *e-waste* para o futuro também deverá ser decrescente.



**Figura 2.7:** Produção de computadores no Brasil  
Fonte IBGE (2018)

Para contextualizar essa evolução de produção de computadores, o presente trabalho analisou a evolução do PIB no Brasil, no mesmo período que foi analisada a produção de computadores, visto que o número de computadores e outros produtos eletrônicos está fortemente correlacionado com o PIB do país, uma vez que esses itens são essenciais para o funcionamento da economia (ROBINSON, 2009). Os dados dessa evolução estão na Tabela 2.2. Essa evolução também pode ser vista na Figura 2.8, onde verifica-se que o PIB do Brasil tem uma queda significativa em 2014 e uma queda maior ainda em 2015, onde ficou negativo em quase 4%. Isso explica a queda na produção de computadores. Com a queda da atividade econômica, as vendas de produtos, inclusive computadores, também caíram.



**Figura 2.8:** Evolução do PIB brasileiro de 2000 a 2015  
Fonte: IBGE (2018)

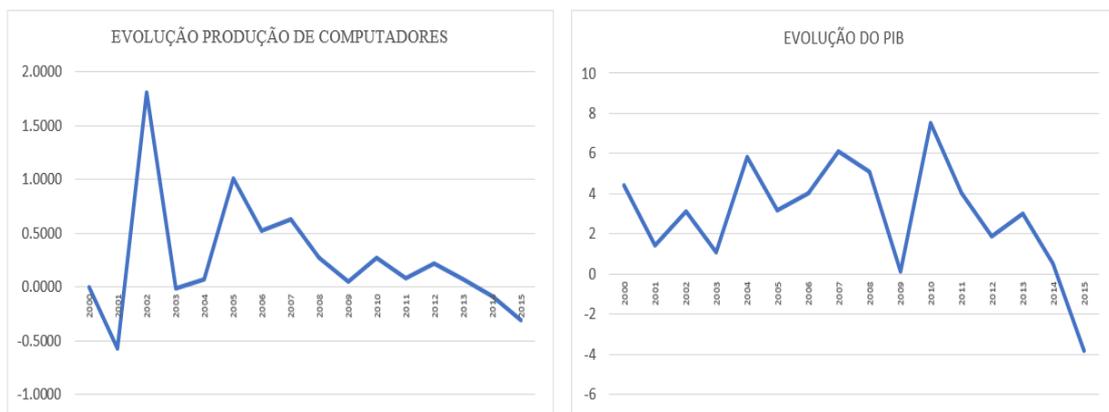
**Tabela 2.2:** Evolução do Produto Interno Bruto (PIB) no Brasil.

Ano	Evolução (em %)	Acumulado (em %)
2000	4,4	4,4
2001	1,4	5,8
2002	3,1	8,9
2003	1,1	10,0
2004	5,8	15,8
2005	3,2	19,0
2006	4,0	23,0
2007	6,1	29,1
2008	5,1	34,2
2009	0,1	34,3
2010	7,5	41,8
2011	4,0	45,8
2012	1,9	47,7
2013	3,0	50,7
2014	0,5	51,2
2015	-3,8	47,4

Fonte: IBGE (2018)

A afirmativa anterior pode ser respaldada, quando plotamos, em um mesmo gráfico, a evolução do PIB e da produção de computadores no Brasil (Figura 2.9). Nessa figura é possível

ver claramente que a evolução da produção de computadores acompanha a evolução do PIB do Brasil, mostrando que, nos momentos de crise, como em 2009 quando o PIB caiu a praticamente zero, a evolução da produção de computadores praticamente estagnou. Outra observação importante que o presente trabalho destaca é que, analisando os dados da evolução da produção de computadores e PIB brasileiros, apesar de as curvas de tendências serem muito semelhantes (Figura 2.9), o acúmulo da evolução da produção de computadores, que foi de mais de 400% (Tabela 2.1), é muito superior ao acumulado da evolução do PIB, que ficou em 47,4% (Tabela 2.2) no período compreendido de 2000 a 2015.



**Figura 2.9:** Evolução da produção de computadores e PIB brasileiros  
Fonte: IBGE (2018)

Em relação a destinação do *e-waste* no Brasil, a realidade também não é tão diferente do que a realidade da maioria dos países em desenvolvimento. Apesar de haver algumas iniciativas, como a do Estado do Rio Grande do Sul, que possui rígidas leis ambientais para o descarte de resíduos (BOND *et al.*, 2010), assim como na maior parte do mundo, especialmente em países em desenvolvimento, o gerenciamento adequado de *e-waste* ainda é um desafio (SOUZA, DE *et al.*, 2016)

Para se ter uma ideia de como é grande esse desafio no Brasil, basta verificar que a taxa estimada de *e-waste* recolhido em 2016 foi de apenas 2% (SOUZA, DE *et al.*, 2016) e que a grande maioria dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos é destinada ao setor informal de reciclagem (Rodrigues, Gunther e Boscov, 2015). Setor como dos catadores que vendem como sucata, ou ainda trituram e exportam para países como Canadá, Bélgica e Cingapura (LI *et al.*, 2013). E o mais grave nessa prática é que existem estudos que apontam que em muitas associações de catadores de recicláveis, por não saberem do potencial tóxico de muitos resíduos eletrônicos, não orientam corretamente seus associados e, dessa maneira, o

trabalho dos catadores é feito de forma artesanal, causando danos ao próprio trabalhador (FRANCO e LANGE, 2011).

Outro exemplo de destinação para setores informais é a prática, bem semelhante às realizadas por países em desenvolvimento, como a Índia, de vender aparelhos de telefones celulares antigos como produto de segunda mão (SILVEIRA e CHANG, 2010). O problema é que essa prática não dá um destino definitivo para os telefones celulares. Mesmo sendo vendidos como equipamentos de segunda mão, vai chegar um momento em que esses aparelhos terão que ser, definitivamente, descartados. Porém, o Brasil ainda não tem um programa de descarte seguro desses equipamentos na maioria das cidades (SILVEIRA e CHANG, 2010).

Quando o *e-waste* não tem como destinação a rede informal de coleta, o destino é, quase sempre, os aterros sanitários, o que contribui para aumentar a degradação ambiental e também colocar em risco a saúde de populações vizinhas a essas regiões, visto que esse tipo de resíduo contém produtos tóxicos (AZEVEDO *et al.*, 2017), como mercúrio, cádmio e chumbo (SONG e LI, 2015).

Apesar dos desafios relatados, as ações concretas brasileiras para enfrentar a questão dos resíduos dos produtos pós consumo são bem recentes, tendo como marco a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (DEMAJOROVIC e MIGLIANO, 2013). Essa política foi regulamentada em 23 de dezembro de 2010, com o objetivo de regular a destinação de resíduos pós consumo (SOUZA, DE *et al.*, 2016). Em relação ao *e-waste*, o princípio do PNRS é a implantação da Logística Reversa de Resíduos de Equipamentos de Elétricos e Eletrônicos, que tem reconhecimento tanto dos pesquisadores acadêmicos, quanto pelos profissionais do setor, como sendo uma ferramenta valiosa na destinação de *e-waste* (DEMAJOROVIC, AUGUSTO e SOUZA, 2016). De acordo com essa lei, além de definir que os consumidores (tanto da população, como das instituições) são responsáveis por descartar seus resíduos eletrônicos separadamente em pontos de entrega adequados, definidos nos Planos Municipais de Resíduos Sólidos (AZEVEDO *et al.*, 2017), também determina que a cadeia constituída pelos produtores, importadores e comerciantes de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE), é responsável pela implantação da Logística Reversa (LR) dos produtos pós consumo (RODRIGUES, GUNTHER e BOSCOV, 2015).

No entanto, a PNRS ainda encontra dificuldades em sua real implementação em relação à coleta, à reciclagem e à logística reversa de diversos resíduos, principalmente o *e-waste* (DEMAJOROVIC e MIGLIANO, 2013). Isso faz com que a implantação da LR, no Brasil, ainda esteja em um estágio muito preliminar (DEMAJOROVIC, AUGUSTO e SOUZA, 2016).

Essas dificuldades existem, principalmente, pelo fato dos sistemas de gestão de resíduos serem complexos e envolverem uma diversidade de partes interessadas, muitas vezes com interesses conflitantes (SOUZA *et al.*, 2015). Também são fonte de dificuldades o desinteresse e o desrespeito de grandes empresas estrangeiras, que resistem em cumprir a legislação ambiental em países em desenvolvimento, como o Brasil, mas as cumprem rigidamente em países desenvolvidos, como nos EUA. Um exemplo dessa atitude das grandes empresas é a rede de coleta de produtos eletrônicos mantidas pelas principais empresas do ramo nos EUA, onde a *Apple*, *Sony*, *Sharp*, *Mitsubishi*, *Samsung*, *Hewlett-Packard*, *Dell*, *LG*, *Lenovo*, *Panasonic* e a *Toshiba* matém pontos de coletas gratuitas ou programas de devolução, através dos serviços postais, dos seus produtos (STHIANNOPKAO e WONG, 2013), enquanto no Brasil essas mesmas empresas não tem essa prática. Outro fator que também pode ter contribuído para dificultar a implantação da PNRS é, como apontado por vários estudos, a escassez de pesquisas sobre o *e-waste* no Brasil, principalmente em relação à gestão adequada da LR do *e-waste* (FRANCO e LANGE, 2011). Esses fatores contribuem para que o Brasil, assim como os demais países em desenvolvimento, tenha seus processos de coleta e tratamento de lixo eletrônico defasados em relação aos países desenvolvidos (SOUZA, DE *et al.*, 2016) e reforçam a percepção de que ainda é necessário melhorar muito suas pesquisas no campo de tratamento e destinação de *e-waste*. Apesar desta percepção, os estudos sobre o *e-waste* no Brasil é relativamente muito recente e, conseqüentemente, há uma carência de estudos sobre o tema (PANIZZON, REICHERT e SCHNEIDER, 2017).

#### **2.1.4 Fração não metálica da Placa de Circuito Impresso**

O grande crescimento nas taxas de geração de lixo eletrônico se reflete na geração de resíduos oriundos de Placas de Circuito Impresso (PCI). Isso se deve ao fato de que as placas de circuito impressos são a base da indústria eletrônica (MARQUES, MARRERO e MALFATTI, 2013), por serem os blocos básicos de construção para quase todos os produtos eletrônicos (YANG *et al.*, 2018).

Os resíduos de PCI são uma mistura heterogênea de metais, não metais e algumas substâncias tóxicas (KAYA, 2016). Em geral, os componentes dos resíduos de PCI são divididos em Frações Metálicas (FMs) e Frações Não Metálicas (FNMs) (MARQUES, MARRERO e MALFATTI, 2013). Essa composição complexa e muito tóxica das PCIs torna a reciclagem desse tipo de resíduo uma tarefa desafiadora (LUHAR e LUHAR, 2019).

Além das dificuldades em relação à complexidade e toxicidade dos componentes, existe também o fator econômico que contribui para um processo inadequado de reciclagem de PCIs. Por ser a força motriz da reciclagem, a recuperação de metais preciosos, que representa cerca de 30% do peso total dos resíduos de PCI, é a meta da maioria dos processos de reciclagem (KAYA, 2016). Os outros 70%, que são compostos basicamente por materiais não metálicos, como resina e fibra de vidro (YANG *et al.*, 2018), quase sempre são descartados de forma inadequada, o que reforça a proposta deste presente trabalho.

## 2.2 Superfície de resposta

### 2.2.1 Fundamentos

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é uma coleção de ferramentas que foi desenvolvida na década de 1950 e teve como objetivo determinar as condições operacionais ideais em aplicações na indústria química (MYERS, KHURI e CARTER, 1989). Depois passou a ser aplicada nas demais indústrias, principalmente quando o objetivo era avaliar as influências das variáveis de entrada no desempenho, ou característica do produto (DRAPER, 1997), com a finalidade de desenvolver, melhorar e otimizar os processos (MCCARTHY, FLICK e MÉRIDA, 2013).

Essa coleção de ferramentas consiste em técnicas matemáticas e estatísticas, usadas para desenvolver uma relação funcional entre uma resposta de interesse,  $y$ , e um número de variáveis de entrada associadas, denominadas por  $x_1, x_2, \dots, x_q$  (KHURI e MUKHOPADHYAY, 2010). Essa relação é denominada  $\phi(\cdot)$  e, geralmente, são representadas por funções polinomiais  $\phi(x_1, x_2, \dots, x_q)$ , que podem ser expandidas usando a série de Taylor e, por isso, podem ser usadas como uma aproximação (CORNELL, 1990).

Entre essas aproximações, ou modelos, que podem representar uma superfície de resposta, destacam-se o modelo de primeiro grau, dado pela Equação (2.1), e o quadrático, dado pela Equação (2.2) (MYERS, KHURI e CARTER, 1989).

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^q \beta_i x_i \quad [2.1]$$

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^q \sum_{i \leq j}^q \beta_{ij} x_i x_j \quad [2.2]$$

O objetivo da MSR é responder a certas perguntas sobre a natureza da função, como se existe máximo ou mínimo, por exemplo (MYERS, KHURI e CARTER, 1989).

Entre os métodos utilizados na MSR, estão os experimentos com misturas, que será objeto da próxima seção.

### 2.2.2 Experimento com misturas

Um tipo de *design* experimental muito útil em diversas áreas de desenvolvimento de produtos é o experimento com misturas (NING, ZHOU e FANG, 2011). Isso fica evidente ao verificar que a literatura estatística mostra vários *designs* de experimento com misturas com aplicações em, praticamente, todas as áreas da indústria, indo da química e processos de alimentos à medicina (COETZER e HAINES, 2017).

Um experimento com misturas é um tipo de experimento de superfície de resposta, onde os fatores são as proporções dos componentes da mistura (OLIVEIRA, de *et al.*, 2011). Em geral, no problema da mistura os resultados dos experimentos são assumidos dependentes apenas das proporções dos componentes participantes da mistura e não da quantidade total da mistura. No experimento com mistura os fatores são utilizados em proporções. As proporções são sempre não negativas, expressas como fração, ou decimal, tendo a soma das proporções dos componentes da mistura sempre igual à uma unidade. Essas condições são representadas matematicamente pelas Equações 2.3 e 2.4, onde  $q$  e  $x_i$  são, respectivamente, a identificação do componente e a proporção de cada componente  $i$  participante de um experimento com mistura.

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, q \quad [2.3]$$

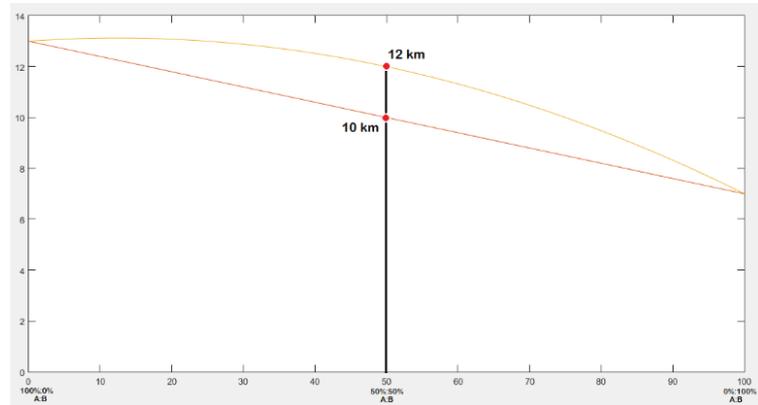
e

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1,0 \quad [2.4]$$

As Equações 2.3 e 2.4, além de mostrar que as proporções são sempre não negativas, e que a soma das proporções, são sempre uma unidade, também mostram que se algum componente participar com uma proporção  $x_i$  igual a uma unidade, obrigatoriamente a mistura será composta somente por esse componente. Nesse caso, o experimento será denominado de um experimento de “mistura pura” ou “mistura com um único componente”.

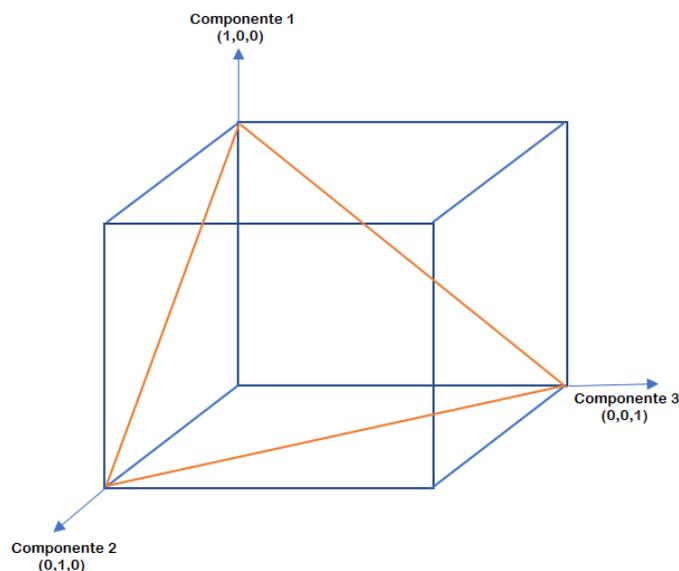
Em virtude das restrições, impostas pelas Equações 2.3 e 2.4 para  $x_i$ , a descrição geométrica do experimento, ou região experimental, é formada por uma superfície contendo todos os pontos que pertencem ao interior ou à fronteira (vértices, arestas, faces etc.) de um espaço *simplex* regular de  $q-1$  dimensões. Por exemplo, quando  $q=2$ , ou seja, um experimento

de mistura utilizando dois componentes, o espaço *simplex* é uma linha reta, como a linha que representa a expectativa do rendimento da mistura de dois tipos de combustíveis em um automóvel (vide Figura 2.10).



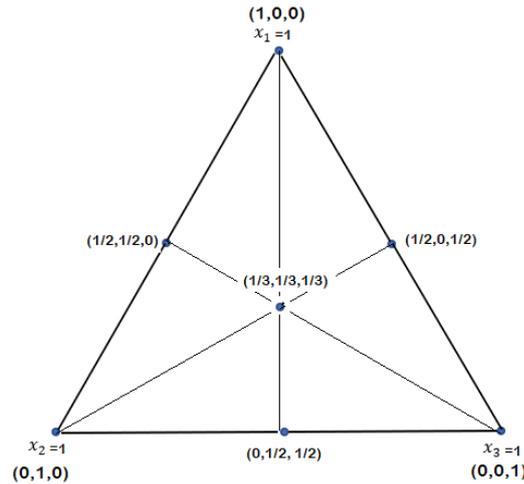
**Figura 2.10:** Espaço *Simplex* do rendimento de um automóvel utilizando uma mistura de dois tipos de combustíveis A e B. A parte linear mostra a expectativa e a não linear mostra os valores observados

Com  $q = 3$ , ou seja, uma mistura com três componentes, o espaço *simplex* é um triângulo equilátero e para  $q = 4$  é um tetraedro. A Figura 2.11 ilustra o espaço *simplex* para o caso de  $q = 3$ , onde as proporções dos componentes são denotadas por  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ . O sistema de coordenadas utilizado para os valores de  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, q$  é denominado de Sistema de Coordenadas *Simplex*.



**Figura 2.11:** Região *simplex* para um experimento com três componentes. Todos os pontos, que representam as proporções dos componentes, estão contidos no triângulo, cuja equação é  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$

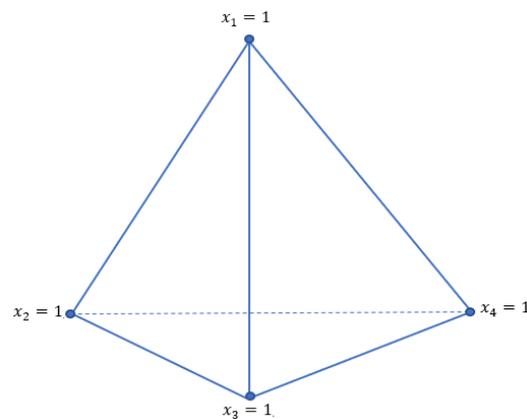
A Figura 2.12 mostra esse sistema de coordenadas para um experimento com três elementos, que é um triângulo equilátero.



**Figura 2.12:** Sistema de coordenada simples para três componentes

Tanto a Figura 2.11, como a Figura 2.13, mostram que os vértices do *simplex*, que neste caso é um triângulo, representam um experimento com apenas um componente e são denotados por  $x_i = 1, x_j = 0$  para  $i, j = 1, 2, 3, i \neq j$ . Os pontos interiores do triângulo representam misturas que são compostas pelos três componentes, ou seja,  $x_1 > 0, x_2 > 0, e x_3 > 0$ . As coordenadas do centróide do triângulo da Figura 2.12 representam a mistura composta pelos três componentes, todos com a mesma proporção de  $1/3$ .

A Figura 2.13 ilustra um sistema de coordenadas simples que, neste caso, é um tetraedro, para um experimento com quatro componentes, onde suas proporções são dadas por  $x_1, x_2, x_3$  e  $x_4$ .



**Figura 2.13:** Tetraedro representando um sistema de coordenadas *simplex* para uma mistura com quatro componentes

Existem alguns experimentos onde as proporções  $x_i$  não pertencem ao intervalo  $[0, 1]$ , pois há algum tipo de limite superior ou inferior para a proporção de alguns, ou até mesmo, todos os componentes. Nesses casos as proporções são representadas matematicamente pela Equação 2.5.

$$0 \leq LI_i \leq x_i \leq LS_i \leq 1,0, \quad 1 \leq i \leq q \quad [2.5]$$

onde  $LI_i$  é o limite inferior e  $LS_i$  é o limite superior para as proporções dos componentes.

Neste caso, existe um *design* apropriado para essas condições que será tratado mais adiante.

A escolha adequada do *design* é muito importante em qualquer investigação da superfície de resposta (KHURI e MUKHOPADHYAY, 2010). Dessa forma, o presente trabalho apresentará os conceitos dos *designs* do experimento com mistura que foram utilizados no desenvolvimento desta pesquisa.

### 2.2.3 Design Simplex-Lattice

O *design simplex-lattice* foi introduzido por SCHEFFÉ (1958), sendo um tipo de planejamento cujos pontos estão quase todos posicionados nas delimitações da área experimental (NING, ZHOU e FANG, 2011).

No *design simplex-lattice* os pontos são distribuídos, uniformemente, sobre toda a superfície de resposta, denominada região *simplex*. Esse arranjo ordenado de pontos, distribuídos uniformemente em um *simplex*, é denominado *lattice* (rede), que nada mais é do que uma matriz de pontos.

Cada grau *lattice* tem uma equação polinomial específica. A notação  $\{q, m\}$  significa que a equação correspondente ao *lattice* tem grau  $m$  e  $q$  componentes sobre o *simplex*. Além de representar o grau da equação,  $m$  também representa o número de níveis igualmente espaçados (ou proporções) para cada componente. Assim, o *simplex-lattice* consiste em todos os  $m + 1$  pontos, igualmente espaçados, cujas coordenadas são dadas pelas combinações das proporções, conforme mostra a Equação 2.6.

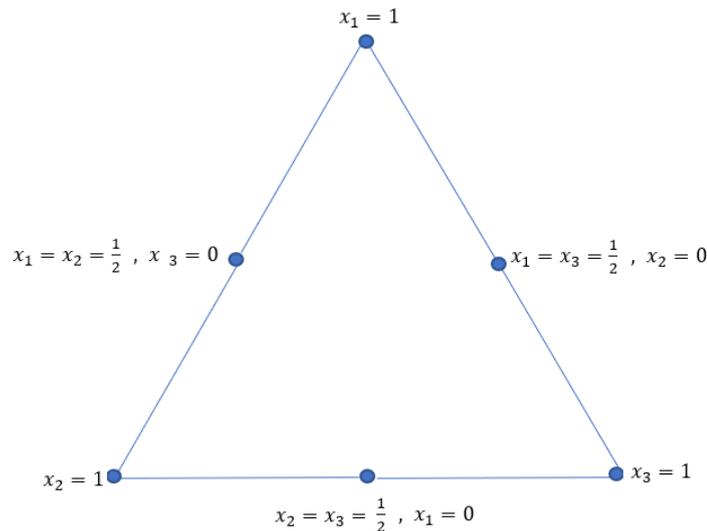
$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad [2.6]$$

A listagem das combinações de componentes específicos compreendendo a rede *simplex*  $\{q, m\}$  é ilustrada como se segue. Num sistema com três componentes ( $q = 3$ ) e que será modelado por uma equação quadrática ( $m = 2$ ), a superfície de resposta, para todas as misturas, é representada por um triângulo equilátero. Assim, seguindo a Equação (2.6), cada

componente assumirá as proporções:  $x_i = 0, \frac{1}{2}$  e  $1$ , resultando no *simplex-lattice*  $\{3, 2\}$ , consistindo dos seis pontos da fronteira do triângulo, dados pela Equação (2.7):

$$(x_1, x_2, x_3) = (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1), \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0\right), \left(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}\right), \left(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \quad [2.7]$$

Os três pontos que têm as coordenadas  $(1, 0, 0)$ ,  $(0, 1, 0)$  e  $(0, 0, 1)$  representam uma mistura simples, ou com apenas um componente. Os pontos, representados por essas coordenadas, são os três vértices do triângulo que representa a *simplex-lattice*. Os pontos de coordenadas  $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0\right)$ ,  $\left(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}\right)$  e  $\left(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$  representam as misturas binárias, ou seja, são misturas com a participação de dois componentes. Dessa forma, geometricamente, as misturas puras são representadas pelos vértices do triângulo e as misturas binárias são representadas pelas arestas do triângulo, sendo que quando a mistura é composta por 50% de cada componente, nesse caso, é representado pelo ponto médio de cada aresta do triângulo. A Figura 2.14 representa um *simplex-lattice*  $\{3, 2\}$ .

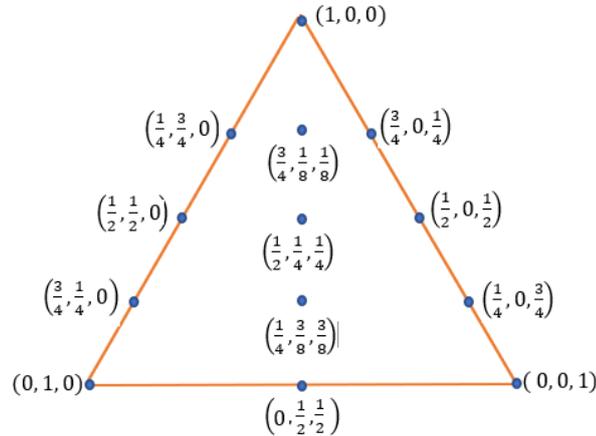


**Figura 2.14:** *Simplex-lattice*  $\{3, 2\}$

Para um *simplex-lattice*  $\{3, 3\}$ , ou seja, um experimento com três componentes e três proporções, todas as possíveis misturas são dadas pelos pontos de coordenadas mostradas na Equação (2.8).

$$(x_1, x_2, x_3) = (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1), \left(\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, 0\right), \left(\frac{2}{3}, 0, \frac{1}{3}\right), \left(\frac{1}{3}, \frac{2}{3}, 0\right), \left(\frac{1}{3}, 0, \frac{2}{3}\right), \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right), \left(0, \frac{2}{3}, \frac{1}{3}\right), \left(0, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}\right) \quad [2.8]$$

A Figura 2.15, que também é um triângulo equilátero, mostra essas proporções, igualmente espaçadas, na superfície de resposta. Como pode ser visto, a quantidade de pontos num planejamento de misturas para um *simplex lattice*  $\{q, m\}$ , é dado pela Equação 2.9 (Scheffé, 1958).



**Figura 2.15:** Coordenadas triangulares  $(x_1, x_2, x_3)$

$$\binom{q+m-1}{m} = \frac{(q+m-1)!}{m!(q-1)!} \quad [2.9]$$

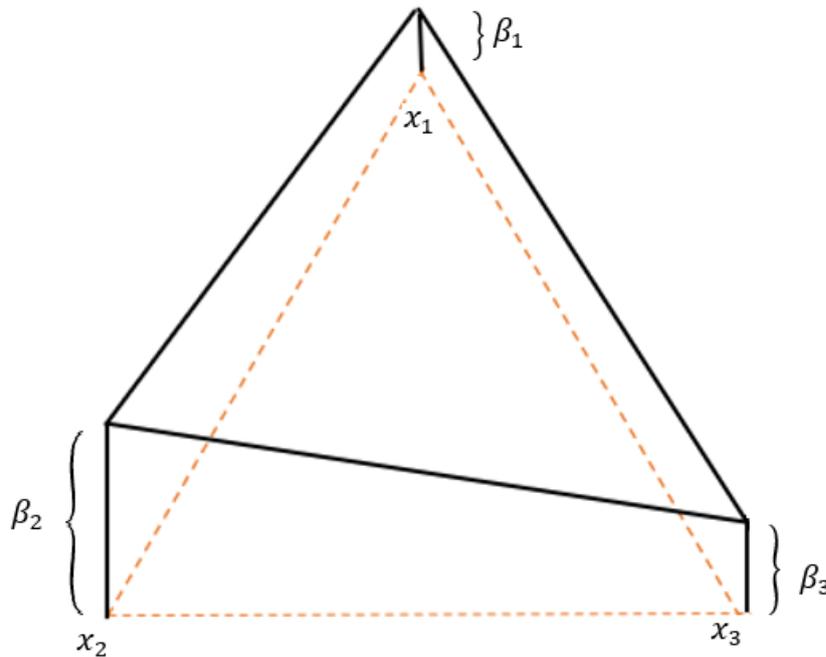
Uma formula geral para a função de regressão que pode ser ajustada aos dados coletados nos pontos de um *simplex-lattice*  $\{q, m\}$ , onde  $q = 3$  e  $m = 1$  ou  $2$ , ou seja, para um experimento com três componentes, com uma função linear ou quadrática, é dada pelas Equações 2.10 e 2.11, respectivamente (CORNELL, 1973).

$$\eta = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad [2.10]$$

$$\eta = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad [2.11]$$

Os termos  $\beta_i x_i$  e  $\beta_{ij} x_i x_j$  para as equações dos polinômios das formas  $\{q, 1\}$  e  $\{q, 2\}$  tem uma interpretação simples. No vértice correspondente ao componente puro 1, tanto na Equação (2.10) como na Equação (2.11), se  $x_1 = 1$  e, conseqüentemente, pela restrição da identidade  $(x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1)$ ,  $x_2 = x_3 = 0$ , ambas as Equações terão  $\eta = \beta_i$ , que neste caso, será  $\eta = \beta_1$ . Os parâmetros  $\beta_i$ , portanto, representarão a resposta esperada para o componente puro  $i$  e, graficamente,  $\beta_i$  são as alturas da superfície no *simplex* dos vértices, onde  $x_i = 1$  para  $i = 1, 2, \dots, q$ . As alturas,  $\beta_i$ , são usualmente não negativas. Quando a Equação (2.1) define exatamente a superfície de resposta, que é o caso quando a mistura entre os componentes é

estritamente linear ou aditiva, então a superfície é representada por um plano sobre o *simplex*. Um exemplo para  $q = 3$  é apresentado na Figura 2.16.



**Figura 2.16:** Superfície plana acima dos três componentes, formando uma superfície triangular. A superfície é expressa como  $\eta = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3$ , onde, nesse caso,  $\beta_2 > \beta_3 > \beta_1$

Quando a mistura entre os componentes é assumidamente linear (Figura 2.16), a resposta para misturas binárias entre os componentes  $i$  e  $j$  são dadas pela Equação 2.10, ficando  $\eta = \beta_i x_i + \beta_j x_j$ . Se, por outro lado, a resposta binária entre os componentes  $i$  e  $j$  for melhor representada pela Equação (2.11), então existe um excesso, que é representado pelo termo  $\beta_{ij} x_i x_j$ . Se altos valores positivos de resposta são desejáveis, e a quantidade  $\beta_{ij}$  for positiva, o excesso é chamado de sinergismo da mistura binária, e  $\beta_{ij}$  é o coeficiente quadrático, ou de segunda ordem, do sinergismo binário. Quando  $\beta_{ij}$  for negativo é, então, denominado antagonismo da mistura binária.

Outra forma de entender os significados de cada termo nos modelos linear e quadrático, dados pelas Equações 2.10 e 2.11, é ver como cada termo, individualmente, contribui para descrever a forma da superfície de resposta da mistura. O termo  $\beta_i x_i$  contribui para o modelo somente se o valor de  $x_i > 0$ , uma vez que  $\beta_i$  represente a altura da superfície acima do *simplex* no vértice  $x_i = 1$ . O termo  $\beta_i x_i$  contribui melhor quando  $x_i = 1$ . O termo  $\beta_{ij} x_i x_j$ , na Equação 2.10, contribui para o modelo em todos os lugares no *simplex* onde, tanto  $x_i$ , quanto  $x_j$ , sejam maiores que zero. Na linha ligando os vértices correspondentes aos componentes  $i$  e  $j$ , o valor

do termo  $\beta_{ij}x_i x_j$  é máximo quando  $\beta_{ij} > 0$ , nos pontos onde  $x_i = x_j = \frac{1}{2}$  e, nesse caso, o seu valor é dado por  $\beta_{ij}x_i x_j = \frac{\beta_{ij}}{4}$ .

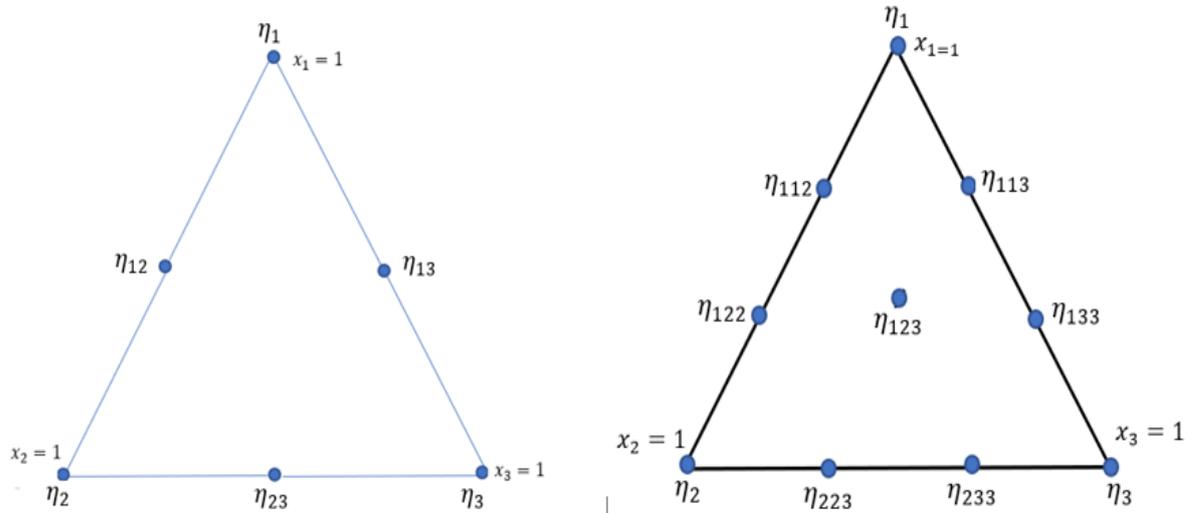
Existe uma relação especial entre o *simplex-lattice*  $\{q, m\}$  e a equação polinomial  $\{q, m\}$ . Essa relação diz que o número de pontos no *lattice* é igual ao número de termos na equação polinomial. Dessa forma, os parâmetros no polinomial podem ser expressos como funções simples das respostas esperadas nos pontos do *simplex-lattice*  $\{q, m\}$ . Para mostrar isso será utilizada a nomenclatura que foi proposta por SCHEFFÉ (1958).

Seja  $\eta_i$  a resposta para o componente puro  $i$ ,  $\eta_{ij}$  a resposta para a mistura binária entre os componentes  $i$  e  $j$ , na qual as proporções, para cada componente, é de  $\frac{1}{2}$ , e  $\eta_{ijk}$  a resposta para a mistura ternária entre os componentes  $i, j$  e  $k$ , todos com proporções iguais a  $\frac{1}{3}$ . A Figura 2.17 mostra a nomenclatura nos pontos do *simplex-lattice*  $\{3, 2\}$  e do *simplex-lattice*  $\{3, 3\}$ , respectivamente. Os índices de cada resposta indicam três características:

1. O número de quantidade de índice é igual ao denominador da fração. Quando uma resposta tem dois índices,  $\eta_{ij}$ , por exemplo, implica que a resposta se refere a uma mistura composta por dois componentes, onde cada componente participa com a proporção  $\frac{1}{2}$ , ou seja  $x_i = x_j = \frac{1}{2}$ .
2. O número de índices distintos indica quantos componentes estão presentes em proporções diferentes de zero. Por exemplo, em  $\eta_{123}$  indica que nessa mistura estão presentes três componentes:  $x_1, x_2$  e  $x_3$ . Já em  $\eta_{122}$  indica uma mistura com dois componentes:  $x_1$  e  $x_2$ .
3. O número de vezes que um índice aparece indica a proporção relativa que o componente participa da mistura. Por exemplo, em  $\eta_{123}$  indica que os três componentes participam, todos, com a mesma proporção, ou seja,  $x_1 = x_2 = x_3 = \frac{1}{3}$ . Já em  $\eta_{133}$  indica que o componente 1 participa com um terço e o componente 3 com dois terços, visto que o índice três aparece duas vezes, ou seja,  $x_1 = \frac{1}{3}$  e  $x_3 = \frac{2}{3}$ .

As equações para representar os parâmetros no modelo polinomial de  $\eta_i, \eta_{ij}$  e  $\eta_{ijk}$  são obtidas resolvendo, simultaneamente, as  $\binom{q+m-1}{m}$  equações. Esse número, além de representar o número de parâmetros na  $\{q, m\}$  equação polinomial, representa também o número de pontos da *lattice* e, assim, o número de expectativa de respostas  $\eta_i$  e  $\eta_{ij}$  medidas nos pontos do  $\{q, m\}$  *simplex-lattice*. Por exemplo, se o modelo quadrático da Equação 2.2 é

usado para um sistema de três componentes e se tem a expectativa de resposta nos pontos de um *simplex-lattice*  $\{3, 2\}$ , seu *design* é mostrado na Figura 2.17 e dada pela Equação 2.12



**Figura 2.17:** Nomenclatura para as respostas nos pontos do *simplex-lattice*  $\{3, 2\}$  e *simplex-lattice*  $\{3, 3\}$

$$\eta = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad [2.12]$$

Substituindo

$$\begin{aligned} \eta_i & \text{ em } x_i = 1, \quad x_j = 0, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad j \neq i \\ \eta_{ij} & \text{ em } x_i = \frac{1}{2}, \quad x_j = \frac{1}{2}, \quad x_k = 0 \quad i < j, \quad j \neq i, j \end{aligned}$$

Resultando as  $\binom{3+2-1}{2} = 6$  equações derivadas da Equação 2.12,

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \beta_1, \quad \eta_2 = \beta_2, \quad \eta_3 = \beta_3 \\ \eta_{12} &= \beta_1 \left(\frac{1}{2}\right) + \beta_2 \left(\frac{1}{2}\right) + \beta_{12} \left(\frac{1}{4}\right) \\ \eta_{13} &= \beta_1 \left(\frac{1}{2}\right) + \beta_3 \left(\frac{1}{2}\right) + \beta_{13} \left(\frac{1}{4}\right) \\ \eta_{23} &= \beta_2 \left(\frac{1}{2}\right) + \beta_3 \left(\frac{1}{2}\right) + \beta_{23} \left(\frac{1}{4}\right) \end{aligned}$$

Resolvendo as seis equações simultaneamente, e isso é possível uma vez que o número de equações é igual ao número de parâmetros desconhecidos, encontram-se as fórmulas para os parâmetros  $\beta_i$  e  $\beta_{ij}$ ,  $i, j = 1, 2, 3$  e  $i < j$ , que são dadas pela Equação 2.13.

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \eta_1, \quad \beta_{12} = 4\eta_{12} - 2\eta_1 - 2\eta_2 \\ \beta_2 &= \eta_2, \quad \beta_{13} = 4\eta_{13} - 2\eta_1 - 2\eta_3 \\ \beta_3 &= \eta_3, \quad \beta_{23} = 4\eta_{23} - 2\eta_2 - 2\eta_3 \end{aligned} \quad [2.13]$$

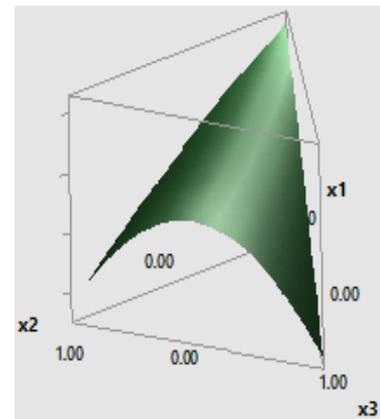
Os parâmetros  $\beta_i$  representam as respostas para os componentes puros  $i$  e  $\beta_{ij}$  são contrastes que comparam as respostas nos pontos médios das linhas, conectando os vértices que contém os componentes  $i$  e  $j$ . Assim, nos seis termos da Equação 2.12, a soma  $\beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3$  representa a mistura linear, ou aditiva, dos três componentes, enquanto os termos  $\beta_{ij}x_ix_j$ ;  $i, j = 1, 2, 3$ ;  $i < j$ , representam as partições do plano da superfície de segundo grau, resultante da mistura não aditiva dos componentes. Na Figura 2.18 é possível identificar as partições planares e não planares, onde a partição planar é o triângulo acima dos três componentes.

As Equações 2.13 são para três componentes, ou seja,  $q = 3$ . Mas, para o caso geral de  $q$  componentes, a Equação 2.13 contém  $\frac{q(q+1)}{2}$  termos e as expectativas de respostas são posicionadas nos pontos de um *design simplex-lattice*  $\{q, 2\}$ . As fórmulas para  $\eta_i$  e  $\eta_{ij}$  são idênticas às Equações 2.13, ou seja, para um  $q$  qualquer, onde  $i, j = 1, 2, \dots, q$ ,  $i < j$ ,

$$\beta_i = \eta_i; \quad \beta_{ij} = 4\eta_{ij} - 2(\eta_i + \eta_j) \quad [2.14]$$

Superfície quadrática

$$\eta = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3$$



**Figura 2.18:** Ilustração da superfície de resposta para três componentes

### 2.2.3.1 Estimando os parâmetros nos polinômios $\{q, m\}$

Os parâmetros do  $\{q, m\}$  polinomial são expressos como funções simples da expectativa de resposta dos pontos do *design simplex-lattice*  $\{q, m\}$ . Usando os valores observados para as respostas dos pontos do *lattice*, os estimadores dos parâmetros  $\beta_i$ ,  $\beta_j$  e  $\beta_{ij}$  nas Equações 2.13 são dados por  $b_i$ ,  $b_j$  e  $b_{ij}$ , respectivamente, e seus valores são em função dos valores observados.

Os valores observados para uma resposta, no  $n$ -ésimo ensaio, é denotado por  $y_\mu$ ,  $1 \leq \mu \leq N$  e é dado por  $y_\mu = \eta_\mu + \varepsilon_\mu$ , onde  $\varepsilon_\mu$  é o erro experimental esperado. É assumido que  $\varepsilon_\mu$ , para todos  $1 \leq \mu \leq N$  são não correlacionados e identicamente distribuídos, com média zero e variância  $\sigma^2$ . As observações para os componentes puros,  $x_i = 1$ ;  $x_j = 0, j \neq i$ , será

denotada por  $y_i$  e as observações, onde os ensaios tem a participação de dois componentes, na proporção de 50% cada um, ou seja,  $x_i = \frac{1}{2}$ ;  $x_j = \frac{1}{2}$ ,  $x_k = 0, i < j \neq k$ , será denotada por  $y_{ij}$ . Substituindo  $\eta_i$  e  $\eta_{ij}$  por  $y_i$  e  $y_{ij}$ , respectivamente, na Equação (2.11) e deixando  $b_i$  e  $b_{ij}$  denotar os estimadores de  $\beta_i$  e  $\beta_{ij}$ , respectivamente, tem-se a Equação 2.15.

$$\begin{aligned} b_i &= y_i, \quad i = 1, 2, \dots, q \\ b_{ij} &= 4y_{ij} - 2(y_i + y_j), \quad i, j = 1, 2, \dots, q, \quad i < j \quad \text{ou} \\ \frac{b_{ij}}{4} \frac{b_{ij}}{4} &= y_{ij} - \frac{y_i + y_j}{2} \end{aligned} \quad [2.15]$$

Se houver réplicas das observações nos ensaios onde os *designs* são  $(x_i = 1, x_j = 0, \dots)$ ;  $(x_i = 0, x_j = 1, \dots)$  e  $(x_i = x_j = \frac{1}{2}, x_k = 0, \dots)$   $i < j, k \neq i, j$ , essas réplicas serão denotadas por  $r_i$ ,  $r_j$  e  $r_{ij}$ , respectivamente. Dessa forma, as médias das réplicas são dadas por  $\bar{y}_i$ ,  $\bar{y}_j$  e  $\bar{y}_{ij}$ , respectivamente. Assim,  $\bar{y}_i$ ,  $\bar{y}_j$  e  $\bar{y}_{ij}$  são substituídas nas Equações 2.15, mudando a Equação para a forma dada por 2.16.

$$\begin{aligned} b_i &= \bar{y}_i, \quad i = 1, 2, \dots, q \\ b_{ij} &= 4\bar{y}_{ij} - 2(\bar{y}_i + \bar{y}_j), \quad i, j = 1, 2, \dots, q, \quad i < j \end{aligned} \quad [2.16]$$

Uma vez que os parâmetros do modelo quadrático, dada pela Equação 2.2, foram estimados, e os estimadores  $b_i$  e  $b_{ij}$  substituem os parâmetros  $\beta_i$  e  $\beta_{ij}$ , respectivamente, a Equação ajustada torna-se aquela dada pela Equação 2.17.

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^q b_i x_i + \sum_i \sum_{i < j}^q b_{ij} x_i x_j \quad [2.17]$$

Um estimador para o valor de resposta no ponto  $x = (x_1, x_2, \dots, x_q)$  dentro ou na fronteira do *simplex* é encontrado substituindo os valores dos  $x_i$ 's na Equação 2.17.

### 2.2.3.2 Propriedades dos Estimadores das Respostas $\hat{y}(x)$

Se os estimadores  $b_i$  e  $b_{ij}$  são funções lineares de variáveis aleatórias e  $y_i$  e  $y_{ij}$  também são, então o estimador  $\hat{y}(x)$ , em  $x$ , é uma variável aleatória. Quando os estimadores  $b_i$  e  $b_{ij}$  não são tendenciosos, o que é o caso quando o modelo ajustado é do mesmo grau de  $x_i$  na superfície verdadeira, então a expectativa para  $\hat{y}(x)$  é  $E[\hat{y}(x)] = \eta$ .

A fórmula para a variância para o estimador  $\hat{y}(x)$  pode ser escrita em termos das variâncias e covariâncias de  $b_i$  e  $b_{ij}$  que são dadas pelas Equações 2.18 e 2.19, onde  $E(\cdot)$  denota valor esperado, ou expectativa,  $var(b_i)$  representa a variância de  $b_i$  e  $cov(b_i, b_{ij})$  covariância entre  $b_i$  e  $b_{ij}$ .

$$\begin{aligned} E(b_i) &= E(\bar{y}_i) = \beta_i \\ var(b_i) &= Var(\bar{y}_i) = \frac{\sigma^2}{r_i} \end{aligned} \quad [2.18]$$

$$\begin{aligned} E(b_{ij}) &= E[4\bar{y}_{ij} - 2(\bar{y}_i + \bar{y}_j)] = \beta_{ij} \\ var(b_{ij}) &= Var[4\bar{y}_{ij} - 2(\bar{y}_i + \bar{y}_j)] = \frac{16\sigma^2}{r_{ij}} + \frac{4\sigma^2}{r_i} + \frac{4\sigma^2}{r_j} \end{aligned}$$

e

$$cov(b_i, b_j) = E[\bar{y}_i(\bar{y}_j)] - E(\bar{y}_i)E(\bar{y}_j) = 0, \quad i \neq j \quad [2.19]$$

$$\begin{aligned} cov(b_i, b_{ij}) &= E[\bar{y}_i(4\bar{y}_{ij} - 2\bar{y}_i - 2\bar{y}_j)] - E(\bar{y}_i)E((4\bar{y}_{ij} - 2\bar{y}_i - 2\bar{y}_j)) \\ &= -2E(\bar{y}_i^2) + 2E\bar{y}_i^2 = -\frac{2\sigma^2}{r_i} \end{aligned}$$

$$cov(b_{ij}, b_{ik}) = \frac{4\sigma^2}{r_i}, \quad j \neq k$$

No entanto, o método mais fácil para obter a variância de  $\hat{y}(x)$  é substituir os estimadores  $b_i$  e  $b_{ij}$  pelas suas respectivas combinações lineares de suas médias,  $\bar{y}_i$  e  $\bar{y}_{ij}$ , que são definidas na Equação 2.16. Dessa forma, a variância de  $\hat{y}(x)$  pode, então, ser escrita como uma função das variâncias de  $\bar{y}_i$  e  $\bar{y}_{ij}$ .

Ao escrever como uma função de médias  $\bar{y}_i$  e  $\bar{y}_{ij}$  nos pontos da lattice, obtêm-se como estimador da resposta:

$$\begin{aligned} \hat{y}(x) &= \sum_{i=1}^q b_i x_i + \sum_i^q \sum_{< j}^q b_{ij} x_i x_j \\ &= \sum_{i=1}^q \bar{y}_i x_i + \sum_i^q \sum_{< j}^q (4\bar{y}_{ij} - 2\bar{y}_i) x_i x_j \\ &= \sum_{i=1}^q \bar{y}_i \left[ x_i - 2x_i \left( \sum_{i \neq j}^q x_j \right) \right] + \sum_i^q \sum_{< j}^q 4\bar{y}_{ij} x_i x_j \end{aligned}$$

$$= \sum_{i=1}^q a_i \bar{y}_i + \sum_i \sum_{i < j}^q a_{ij} \bar{y}_{ij} \quad [2.20]$$

onde  $a_i = x_i(2x_i - 1)$  e  $a_{ij} = 4x_i x_j$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, q$ . Para os coeficientes  $a_i$  e  $a_{ij}$ , os valores de  $x_i$  são especificados pelos valores em  $x = (x_1, x_2, \dots, x_q)$ , sendo fixados sem erros.

Como  $\bar{y}_i$  e  $\bar{y}_{ij}$  são as médias das  $r_i$  e  $r_{ij}$  observações, a variância de  $\hat{y}(x)$  pode ser escrita como:

$$var[\hat{y}(x)] = \sigma^2 \left\{ \sum_{i=1}^q \frac{a_i^2}{r_i} + \sum_i \sum_{i < j}^q \frac{a_{ij}^2}{r_{ij}} \right\} \quad [2.21]$$

Quando há um número igual de observações,  $r$ , em cada ponto da lattice, a fórmula para a variância da resposta estimada no ponto  $x$  é simplificada para:

$$var[\hat{y}(x)] = \frac{\sigma^2}{r} \left\{ \sum_{i=1}^q a_i^2 + \sum_i \sum_{i < j}^q a_{ij}^2 \right\} \quad [2.22]$$

Na Equação 2.22 a quantidade  $\frac{\sigma^2}{r}$  é dependente da precisão (através de  $\sigma^2$ ) das observações experimental, enquanto

$$\sum_{i=1}^q a_i^2 + \sum_i \sum_{i < j}^q a_{ij}^2$$

é dependente somente da composição da mistura para o qual o estimador  $\hat{y}(x_i)$  está sendo considerado. Quando  $\sigma^2$  é desconhecido, pode ser estimado, usando a variância amostral,  $s^2$ , das  $r_i$  e  $r_{ij}$  observações replicadas. Em outras palavras, uma estimativa para a  $var[\hat{y}(x)]$  é obtida substituindo  $\sigma^2$  por  $s^2$  na Equação 2.21, e denotando por  $\widehat{var}[\hat{y}(x)]$ . Finalmente, o intervalo de confiança para  $\eta$ , com  $(1 - \alpha) \times 100\%$  é dado por:

$$\hat{y}(x) - \Delta < \eta < \hat{y}(x) + \Delta \quad [2.23]$$

onde  $\Delta = [t_{f, \alpha/2}] \{ \widehat{\text{var}}[\hat{y}(x)] \}^{\frac{1}{2}}$ ,  $f$  é o número de liberdade associado com a estimativa  $s^2$  da amostra usada para estimar  $\sigma^2$ , e  $(t_{f, \alpha/2})$  é o  $t$  - *value* da tabela com  $f$  grau de liberdade e  $\alpha/2$  nível de significância.

#### 2.2.4 Design Simplex-centroide

No *design* de  $q$ -componentes no *simplex-centroide*, o número de pontos distintos é  $2^q - 1$ , que correspondem a soma das  $q$  permutações de  $(1, 0, 0, \dots, 0)$ , para misturas com apenas um componente, com as  $\binom{q}{2}$  permutações de  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0, \dots, 0)$  para as misturas binárias, de  $\binom{q}{3}$  permutações de  $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 0, \dots, 0)$  para as misturas ternárias e, assim por diante, com o ponto de centróide  $(\frac{1}{q}, \frac{1}{q}, \dots, \frac{1}{q})$ .

Em outras palavras, o *design* consiste em cada subconjunto, não vazio, dos  $q$  componentes, mas apenas com as misturas em que os componentes aparecem participando com a mesma proporção. A Figura 2.19 ilustra o *design simplex-centroide* para três componentes.

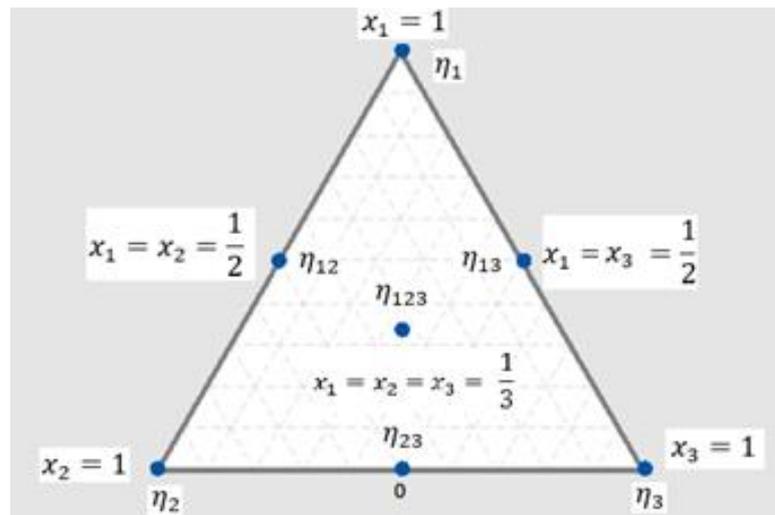


Figura 2.19: Design simplex-centroide para três componentes

Nos pontos do *design simplex-centroide*, dados sobre as respostas são coletados e um polinômio é ajustado com os mesmos números de termos, ou parâmetros a serem estimados, que os pontos associados ao *design*. A equação polinomial fica, então como na Equação (2.24).

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j < k}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \dots + \beta_{12\dots q} x_1 x_2 \dots x_q \quad [2.24]$$

Como no caso do modelo *simplex-lattice*, que foram expressos na forma canônica nas Equações 2.1 e 2.2, o parâmetro  $\beta_i$  na Equação 2.24 representa a expectativa de resposta para o componente puro  $i$ , e é denominado de valor de mistura linear do componente  $i$ , e o parâmetro  $\beta_{ij}$  é o coeficiente da mistura dos componentes  $i$  e  $j$ . O parâmetro  $\beta_{ijk}$  é definido similarmente ao parâmetro  $\beta_{ij}$ .

Os  $2^q - 1$  parâmetros na Equação 2.24 são expressos como funções lineares da expectativa de resposta nos pontos do *design simplex-centroide*. Por exemplo, se  $\eta_i, \eta_{ij}$  e  $\eta_{ijk}$  forem substituídos pelas respostas  $x_i = 1, x_j = 0, i \neq j$ , por  $x_i = x_j = \frac{1}{2}$  e  $x_i = x_j = x_k = \frac{1}{3}$ , respectivamente, para todos os  $i, j$  e  $k$ , então os parâmetros serão como os dados pela Equação (2.25).

$$\begin{aligned}\beta_i &= \eta_i \\ \beta_{ij} &= 2\{2^1\eta_{ij} - 1^1(\eta_i + \eta_j)\} \\ \beta_{ijk} &= 3\{3^2\eta_{ijk} - 2^2(\eta_{ij} + \eta_{ik} + \eta_{jk}) + 1^2(\eta_i + \eta_j + \eta_k)\}\end{aligned}\quad [2.25]$$

Generalizando, denotando por  $S_r$  qualquer subconjunto  $\{i_1, i_2, \dots, i_r\}$  de  $r$  elementos, onde  $r = 1, 2, \dots, q$ , então a fórmula geral para os parâmetros do modelo é esta dada pela Equação (2.26).

$$\begin{aligned}\beta_{S_r} &= r\{r^{r-1}L_r(S_r) - (r-1)^{r-1}L_{r-1}(S_r) + \dots + (-1)^{r-1}1^{r-1}L_1(S_r)\} \\ &= \left\{ \sum_{t=1}^r (-1)^{r-t} t^{r-t} L_t(S_r) \right\}\end{aligned}\quad [2.26]$$

onde  $L_t(S_r)$  é a soma das respostas de todos  $\binom{r}{t}$  das  $t$ -nárias misturas com igual proporção formada com os  $r$  componentes em  $S_r$ .

As fórmulas para estimar os parâmetros na Equação 2.24 são as fórmulas dadas pela Equação 2.26, com as médias  $\bar{y}_i, \bar{y}_{ij}, \bar{y}_{ijk}, \dots$  sendo substituídos pelos respectivos  $\eta_i, \eta_{ij}, \eta_{ijk}$ , na Equação 2.26. Isso pode ser visto na Equação 2.25, onde as expectativas de respostas são localizadas nos pontos do *design simplex-centroide* de três elementos. Ao substituir  $\eta_i, \eta_{ij}$  e  $\eta_{123}$  por  $\bar{y}_i, \bar{y}_{ij}$  e  $\bar{y}_{123}$ , respectivamente, então  $b_{12}$ , que é um estimador para  $\beta_{12}$ , é escrito estabelecendo  $S_r = 12$  e  $r = 2$ , como mostrado na Equação (2.27).

$$b_{12} = 2[(-1)^{2-1}1^{2-1}L_1(12) + (-1)^{2-2}2^{2-1}L_2(12)]$$

$$\begin{aligned}
&= 2[-(\bar{y}_1 + \bar{y}_2) + 2\bar{y}_{12}] \quad \text{ou} \quad [2.27] \\
b_{12} &= 4\bar{y}_{12} - 2(\bar{y}_1 + \bar{y}_2)
\end{aligned}$$

uma vez que  $L_1(12) = \bar{y}_1 + \bar{y}_2$  e  $L_2(12) = \bar{y}_{12}$ . A fórmula da Equação 2.27 é idêntica para a Equação 2.14 ou 2.15, que foram utilizadas anteriormente para calcular  $b_{12}$ .

A magnitude da variância e da covariância dos parâmetros estimados  $y_i$  e  $y_{ij}$  que substituíram  $\eta_i$  e  $\eta_{ij}$ , respectivamente, na Equação 2.26, são obtidos da seguinte forma: sejam dois subconjuntos, não vazios,  $S_r$  e  $S_{r'}$ , de  $\{1, 2, \dots, q\}$ , com  $r$  e  $r'$  elementos respectivamente, e seja  $h$  o número de elementos que  $S_r$  e  $S_{r'}$  tem em comum. Por exemplo, se  $S_{r'} = 123$  e  $S_r = 12$ , então  $h = 2$ . Quando  $h = 0$ , nenhuma das respostas observadas foi utilizada para estimar os estimadores  $\beta_{S_r}$  e  $\beta_{S_{r'}}$ , no modelo dado pela Equação 2.26 e, nesse caso, os estimadores são não correlacionados.

Se  $h > 0$ , e for estabelecido que  $r < r'$ , então  $S_r = \{1, 2, \dots, r\}$  e  $S_{r'} = \{1, 2, \dots, h, r+1, \dots, r+r'-h\}$ . As respostas observadas que aparecem tanto em  $b_{S_r}$  como  $b_{S_{r'}}$  serão denotadas por  $y_i$  e  $y_{ij}$ , e assim por diante. Haverá, portanto uma quantidade  $h$  de  $y_i$ ,  $1 \leq i \leq h$  comuns a ambos os estimadores  $\beta_{S_r}$  e  $\beta_{S_{r'}}$ . Também haverá uma quantidade  $\binom{h}{2}$  de  $y_{ij}$ ,  $1 \leq i < j \leq h$  e, finalmente, uma quantidade  $\binom{h}{t}$  de  $y_{j_1 j_2 \dots j_t}$ ,  $1 \leq j_1 < \dots < j_t \leq h$  comuns a ambos os estimadores, e os coeficientes dos  $y_{j_1 j_2 \dots j_r}$  são, da Equação (2.23),  $r(-1)^{r-1}t^{r-1}$  para  $b_{S_r}$  e  $r'(-1)^{r'-1}t^{r'-1}$  para  $b_{S_{r'}}$ . Consequentemente:

$$\begin{aligned}
cov(b_{S_r}, b_{S_{r'}}) &= \sum_{t=1}^h \binom{h}{t} r(-1)^{r-t} t^{r-1} r'(-1)^{r'-t} t^{r'-1} \sigma^2 \\
&= rr' \{f(r+r', h)\} \sigma^2
\end{aligned}$$

onde

$$f(s, h) = (-1)^s \sum_{t=1}^h \binom{h}{t} t^{s-2}$$

Se  $h = 0$ , por definição,  $f(s, 0) = 0$  e se  $r = r' = h$ , então  $b_{S_r}$  e  $b_{S_{r'}}$  tem os mesmos valores e nesse caso:

$$var(b_{S_r}) = \tilde{g}(r) \sigma^2 = r^2 f(2r, r) \sigma^2 = \sum_{t=1}^r \binom{r}{t} t^{2r-2} \sigma^2 \quad [2.28]$$

### 2.2.5 *Design* vértices extremos

Muitas vezes, na prática, o experimentador é confrontado com restrições nas proporções de alguns, ou até mesmo de todos, os componentes que farão parte de um experimento com mistura. Nesse caso o *design* de vértices extremos é indicado (MCLEAN e ANDERSON, 1966). Essas restrições se dão por vários motivos como, recursos limitados, ou mesmo por alguma legislação, como a legislação brasileira que obriga a utilização de uma porcentagem de álcool na gasolina. Dessa forma, o *design* de vértices extremos permite que a proporção de cada componente, possa ter um limite superior, ou inferior, ou ambos. Nesse *design* as restrições para as proporções dos componentes, dadas pelas Equações 2.3 passam a ser dadas pelas seguintes equações:

$$0 \leq LI_i \leq x_i \leq LS_i \leq 1 \quad [2.29]$$

Onde  $LI_i$  é o limite inferior para a proporção do componente  $i$  e  $LS_i$  é o limite superior para a proporção do componente  $i$ .

Outra restrição que deve ser respeitada, para que o *design* seja o de vértices extremos, é que  $LI_i \neq LS_i$ , para todo  $i = 1, 2, \dots, q$ .

Ao contrário dos *designs* anteriormente vistos aqui, por causa das restrições das proporções dos componentes, o espaço *simplex* não é, necessariamente, um polígono regular, como um triângulo equilátero para o caso de um experimento com três componentes. Ao invés disso, o espaço fatorial, no *design* de vértices extremos, pode ser polígonos irregulares (Ding *et al.*, 1999). Fica claro que, nesse *design*, quando somente um ou dois componentes têm restrições, a forma do espaço fator resultante é mais simples do que no caso em que todos os componentes do experimento são restritos, tanto superiormente, como inferiormente. Nesse caso, o espaço fator resultante tem a forma de um hiper poliedro convexo.

Após serem impostos os limites, as fronteiras da região formada pelas restrições, em ambos os casos, tanto para restrições para alguns componentes, como para todos os componentes, são usadas para localização dos pontos do *design*. Os vértices extremos, os pontos médios das arestas e os centróides das faces serão usados para estimar a superfície de resposta.

Além do conjunto de pontos, utilizado para a estimar a superfície de resposta, é necessário um modelo. Para aproximar a superfície de resposta, usando um modelo quadrático, (CORNELL, 1990) usa-se a equação:

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j}^q \beta_{ij} x_i x_j \quad [2.30]$$

Nesse modelo são necessários, no mínimo,  $\frac{1}{2}q(q+1)$  pontos (MCLEAN e ANDERSON, 1966), para coletar as observações, uma vez que esse é o número de parâmetros da Equação 2.30. Em geral, esses pontos consistem nos  $q$  vértices extremos, os pontos médios das, ao menos,  $\frac{1}{2}q(q-1)$  arestas e um subconjunto dos centróides das faces. Se for necessária uma estimativa de erro, ou um teste para verificar o ajuste do modelo, serão necessários pontos adicionais. No caso da necessidade de testar o ajuste do modelo, dado pela Equação 2.30, os pontos do centróide facial são mais comumente utilizados.

Vale ressaltar que, após definidas todas as restrições e os pontos bases do *design*, as coordenadas dos vértices são fornecidas pelos limites superiores e inferiores dos componentes. Ou seja, para um experimento com três fatores, o vértice extremo entre os fatores  $x_1$  e  $x_2$  tem sempre em sua coordenada ou o limite superior ou o limite inferior ou ambos do componente um ou dois, ou ainda dos dois.

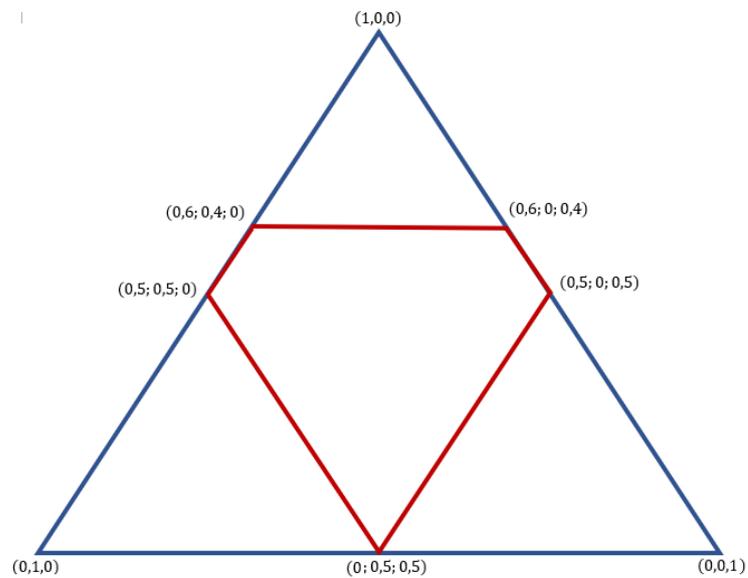
Outro passo importante na configuração do *design* de vértices extremos é verificar se os limites impostos são consistentes. Para isso deve ser considerada, além das restrições dadas pelas Equações 2.29, também as restrições dadas pelas Equações 2.3 e 2.4, que são válidas para todos os experimentos com misturas. As restrições  $LI_i$  e  $LS_i$ , para as proporções de  $x_i$ , para todo  $i = 1, 2, \dots, q$  são consistentes se respeitadas as condições dadas pelas equações:

$$LI_i \geq \left( 1 - \sum_{j \neq i}^q LS_j \right) \quad i, j = 1, 2, \dots, q \quad [2.31]$$

Por exemplo, na configuração de um experimento de mistura, com três componentes, onde os limites impostos pelo experimentador são  $0,2 \leq x_1 \leq 0,3$ ;  $0,3 \leq x_2 \leq 0,5$  e  $0,1 \leq x_3 \leq 0,4$  é uma configuração inconsistente. O motivo é que  $[1 - (0,5 + 0,3)] = 0,2 > LI_3 = 0,1$ , não respeitando, assim, a condição imposta pelas Equações 2.31. Raciocínio análogo vale para verificar se os limites superiores são consistentes. Para isso, basta substituir, nas Equações 2.31, as variáveis  $LI_i$  por  $LS_i$  e  $LS_j$  por  $LI_j$ .

Um exemplo de uma configuração consistente para um experimento com misturas, com três componentes, todos com restrição, seria:  $0,4 \leq x_1 \leq 0,6$ ;  $0,1 \leq x_2 \leq 0,5$  e  $0,3 \leq x_3 \leq$

0,5. Essa configuração respeita as restrições dadas pelas Equações 2.31. A Figura 2.20 mostra o espaço amostral dessa configuração, destacando-se as coordenadas dos vértices, que são:  $(0,6; 0; 0,4)$ ,  $(0,5; 0; 0,5)$ ,  $(0; 0,5; 0,5)$ ,  $(0,5; 0,5; 0)$  e  $(0,6; 0,4; 0)$ . Quando as restrições não são consistentes são necessários fazer ajustes nos limites superiores e/ou inferiores, para atender as restrições dadas pelas Equações 2.31 e, conseqüentemente, passarem a ser consistentes. Sintetizando esse tópico, as principais diferenças entre o *design* de vértices extremos com os demais *designs* de experimento com misturas, vistos nesse trabalho, são a forma geométrica do espaço experimental e as restrições para os limites superior e inferior.



**Figura 2.20:** Espaço experimental para um experimento com misturas, com três componentes, todos eles com restrições em seus limites superiores e inferiores

## CAPÍTULO 3 - MÉTODO DE PESQUISA

### 3.1 Planejamento Experimental

Com o objetivo de auxiliar no delineamento experimental, foi realizado um experimento preliminar. As proporções utilizadas nesse experimento foram definidas conforme o delineamento experimental adotado por este estudo, que é o experimento com misturas. Para o experimento preliminar foi utilizado o *design simplex-lattice*, com grau dois, onde as proporções de cada componente são dadas pela Equação 2.6. Dessa forma, as porcentagens para os componentes investigados por este trabalho, nos testes preliminares, são dadas pela Equação (3.1).

$$x_i = 0, \frac{1}{2}, \frac{2}{2} \quad [3.1]$$

Além dos percentuais fornecidos pelo método *simplex-lattice*, foi adicionado um percentual de 7,5%, porque existem vários estudos, como (GÓMEZ *et al.*, 2020), (LUHAR e LUHAR, 2019) e (DAMAL, LONDHE e MANE, 2015), indicando que os resultados ótimos, para substituição natural dos agregados por resíduo, estão em torno dessa taxa.

Nesse experimento preliminar foi realizado o teste de *slump*, segundo a Norma ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015), no concreto com as seguintes porcentagens de substituição de agregado graúdo por *e-waste*: 0%; 7,5%, 50% e 100%. O objetivo deste teste é verificar até qual porcentagem de substituição de agregado graúdo natural por *e-waste*, produz-se um concreto que possa ser classificado como um concreto da classe S10, tendo aplicações como concreto extrusado, vibro prensado ou centrifugado (ABNT, 2015).

O segundo teste foi o teste de resistência característica à compressão (FCK). O teste foi realizado seguindo a Norma ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015), usando corpos de prova moldados de acordo com a Norma ABNT NBR 5739 (ABNT, 2007). Este teste teve por objetivo identificar qual faixa de substituição de agregado natural por *e-waste* produz um concreto que possa ser classificado como concreto estrutural, ou seja, um concreto que seja classificado como concreto de resistência do grupo I, da Tabela 1 da Norma ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015).

O *e-waste* foi coletado em uma gincana estudantil realizada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – IFSULDEMINAS. Apesar da

heterogeneidade, a grande maioria do material coletado foi de Placas de Circuitos Impressos – PCI, como pode ser visto na Figura 3.1.



**Figura 3.1:** *E-waste* coletado pelos alunos participantes da gincana do IFSULDEMINAS

A Figura 3.2 mostra o lixo eletrônico sendo transportado, por um veículo do IFSULDEMINAS, para um laboratório em São Paulo, onde foi triturado.

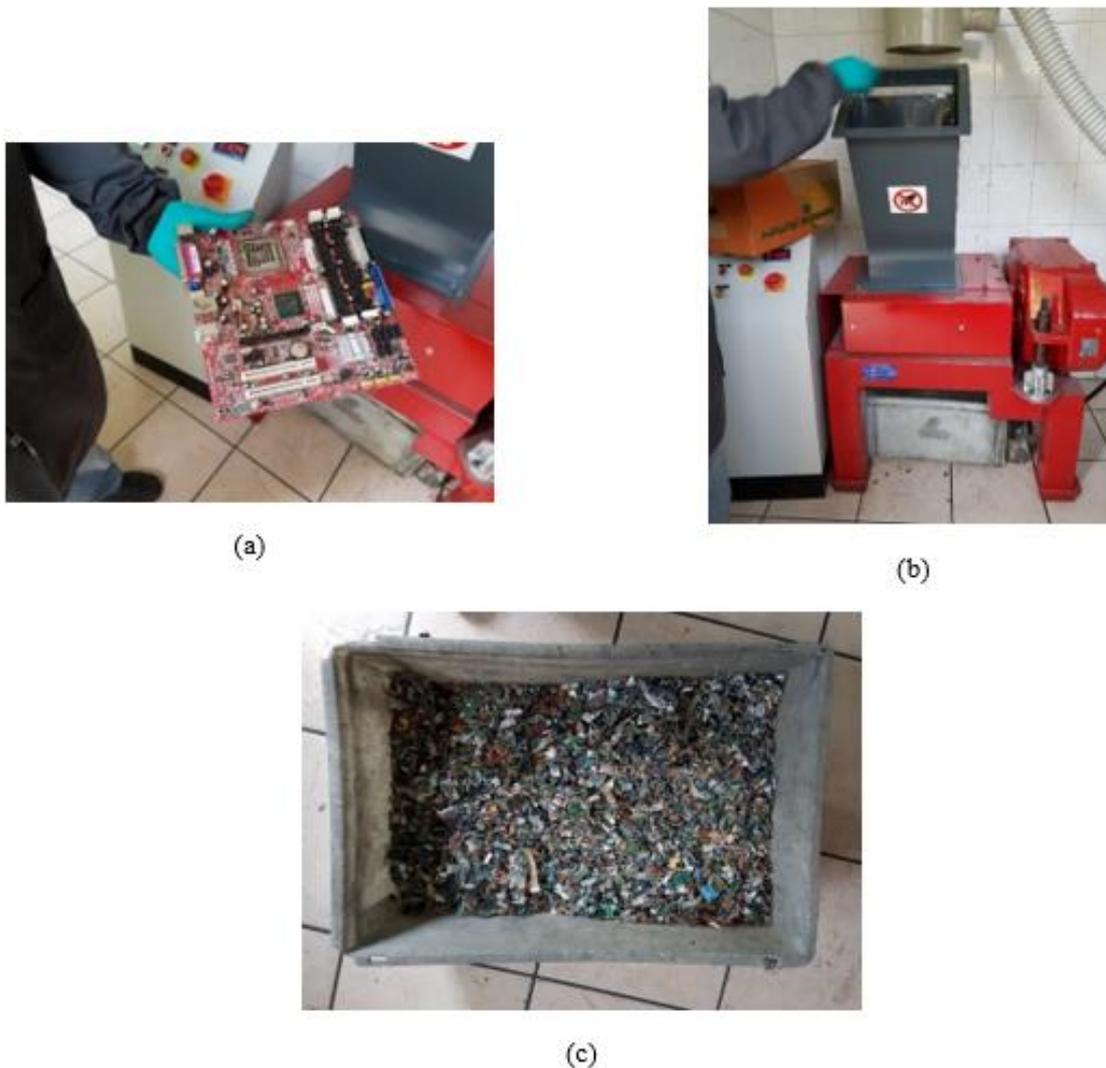


**Figura 3.2:** Transporte do *e-waste* do IFSULDEMINAS para o laboratório da Lorene Importação e Exportação Ltda

O *e-waste* coletado na gincana foi triturado em trituradores, como mostram as Figuras 3.3 (a) e (b). A Figura 3.3 (c) mostra o *e-waste* já triturado.

A Tabela 3.1 mostra os traços do experimento preliminar. O traço de controle utilizado foi: 23,080 kg de cimento *Portland*; 39,466 kg de brita; 23,477 kg de pó de pedra; 7,560 kg de água e 92,0 gramas de aditivo (GRILLO, 2014). Os componentes dos traços: agregado graúdo

é a brita 01, o agregado miúdo é o pó de brita, o cimento é o CII do fabricante *Holcim* e o aditivo é um super plastificante de 3ª geração à base de poli carboxilato.



**Figura 3.3:** Trituradores utilizados para triturar o *e-waste* (a) e (b) e o material já triturado (c)

**Tabela 3.1:** Traços utilizados no experimento preliminar

Componente	Porcentagem de <i>e-waste</i>			
	000,0 %	007,5 %	050,0 %	100,0 %
Cimento	23,080 kg	23,080 kg	23,080 kg	23,080 kg
Brita 01	39,466 kg	39,466 kg	39,466 kg	39,466 kg
<i>E-waste</i>	00,000 kg	02,118 kg	1,4120 kg	28,240 kg
Pó de Brita	28,240 kg	26,122 kg	14,120 kg	00,000 kg
Água	07,560 L	07,560 L	07,560 L	07,560 L
Aditivo	92,000 g	92,000 g	92,000 g	92,000 g

A Figura 3.4 (a) mostra os componentes separados, conforme as medidas indicadas na Tabela 3.1, e a Figura 3.4 (b) mostra os componentes sendo processados na betoneira.



(a)



(b)

**Figura 3.4:** Componentes separados conforme a especificação (a) e os componentes sendo processados na betoneira (b)

Após o processamento dos componentes na betoneira, foi feito o ensaio de *slump*. Esse ensaio é um teste de fluxo que foi realizado para avaliar as propriedades de fluxo e segregação de cada mistura de concreto (TREGGER *et al.*, 2012). A Figura 3.5 mostra a realização desse ensaio. Por meio desse teste também é realizada uma classificação, em relação à sua consistência no estado fresco de acordo com a Norma ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015).



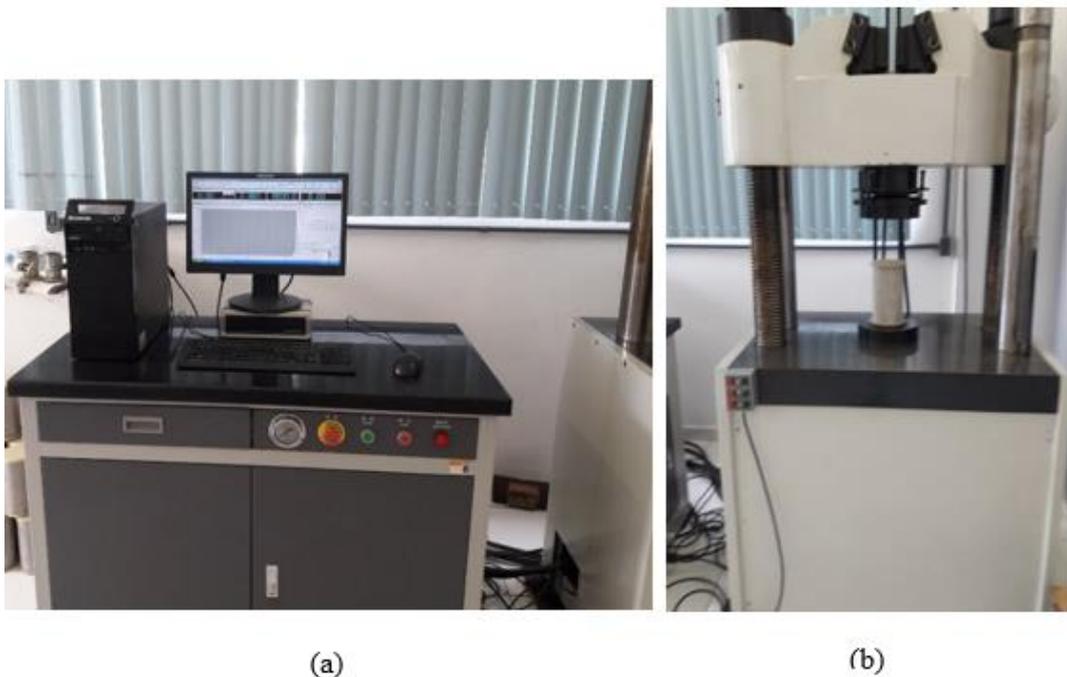
**Figura 3.5:** Medição do *slump* do concreto utilizado para confeccionar os corpos de prova

Após os componentes serem misturados na betoneira, foram confeccionados os corpos de prova, conforme pode ser visto na Figura 3.6.



**Figura 3.6:** Corpos de prova confeccionados com misturas contendo (da esquerda para a direita) 100%, 50%, 7,5% e 0% de *e-waste*

Seguindo a Norma ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015), foi realizado o teste de Resistência Característica do Concreto à Compressão, cuja sigla do termo em inglês *Feature Compression Know*, é  $f_{ck}$ , e sua unidade é o MPa (Mega Pascal). Para realizar esse teste foi utilizada a máquina de teste universal ASTM-d1000, com capacidade de 100.000 Kgf. Esse equipamento é mostrado nas Figuras 3.7 (a) e (b).



**Figura 3.7:** WAW – 1000C *Computer Controlled Electro-Hydraulic Servo Universal Testing Machine* (a); *Universal Testing Machine* (b)

Utilizando os dados fornecidos pelo experimento preliminar, o presente trabalho realizou o experimento principal. Nesse experimento principal foram investigadas duas hipóteses. A primeira é que não há diferença significativa na resistência à compressão do concreto, produzido com a substituição de 20% do cimento *Portland* por cinza volante, em

relação à resistência à compressão do concreto produzido apenas com cimento *Portland*. A segunda é que a substituição de partes de agregados naturais pela FNMs produz um concreto que pode ser utilizado como concreto estrutural.

O traço do concreto, utilizado no experimento principal, foi o mesmo usado no experimento preliminar. A Tabela 3.1 traz os traços expressos em quilos, para uma quantidade de 40 metros cúbico. A Tabela 3.2 converte o traço da Tabela 3.1 em traço unitário. No traço unitário as proporções são expressas em relação ao cimento. Por isso a primeira proporção é sempre um, pois representa a proporção de cimento, em relação ao próprio cimento. No traço unitário as proporções para o traço de controle são 1:1,016:1,710:0,387:5,98, que significa:

- 23,080 kg de cimento/23,080 kg de cimento = 1;
- 23,447 kg de agregado fino/23,080 kg de cimento = 1,016;
- 39,466 kg de agregado grosso/23,080 kg de cimento = 1,710;
- 08,920 kg de água/23,080 kg de cimento = 0,387; e
- 138,000 g de aditivo/23,080 kg de cimento = 5,98 g

Tabela 3.2: Traço unitário para a mistura de controle

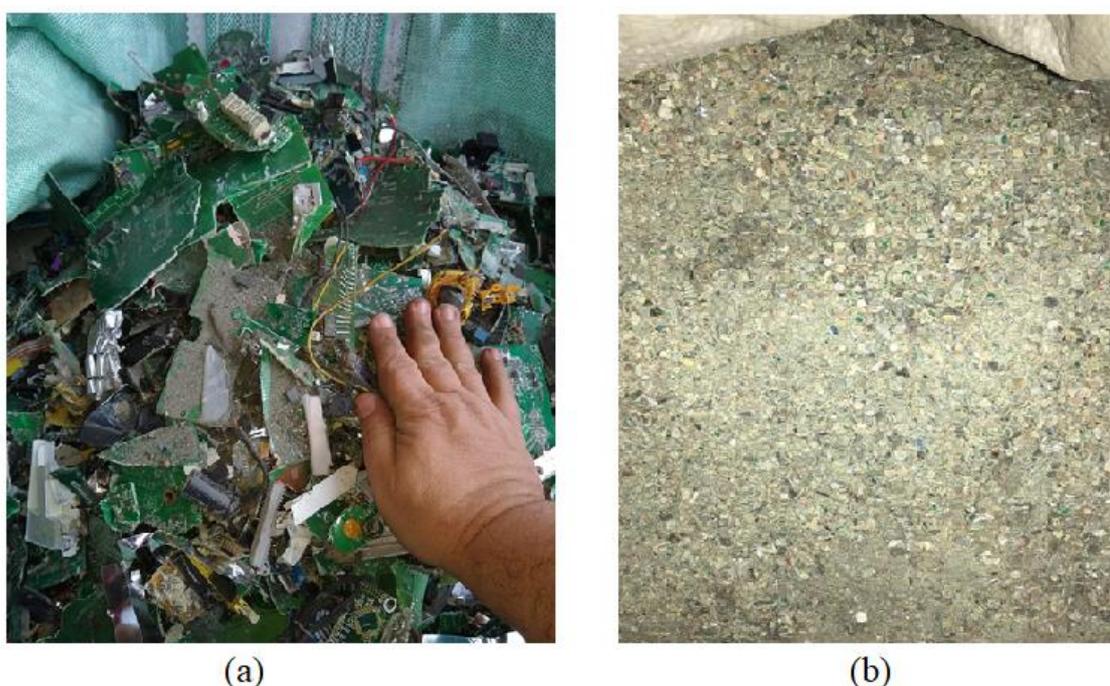
Cimento	Agregado Fino		Agregado grosso		Água	Aditivo
	Pó de brita	<i>E-waste</i>	Brita 01	<i>E-waste</i>		
1	1,016 kg	0	1,710 kg	0	0,387 kg	5,98 g

Para definir a cinza volante como substituto de parte do cimento *Portland*, este presente trabalho investigou quais resíduos estão sendo estudados para esse fim. Verificou-se que atualmente os resíduos mais utilizados para substituir o cimento *Portland* na produção de concreto são cinza volante, sílica ativa, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e escória de alto forno triturada (AMRAN, DEBBARMA e OZBAKKALOGLU, 2021). Este presente trabalho optou por utilizar cinzas volantes, que são produzidas em grandes quantidades pelas usinas como resíduo (TOUFIGH e JAFARI, 2021) e é o material cimentício mais amplamente disponível no mundo (AREZOUMANDI e VOLZ, 2013). Além de ser um produto abundante no mundo, vários estudos indicam que a substituição de parte do cimento *Portland* por cinzas volantes pode conferir ao concreto propriedades químicas e mecânicas superiores ao concreto que utiliza apenas cimento *Portland* (SHI *et al.*, 2012).

Como as taxas de substituição do cimento *Portland* por cinzas volantes geralmente variam de 15% a 25% (AREZOUMANDI e VOLZ, 2013), este presente trabalho optou por utilizar o percentual utilizado por (GESOĞLU *et al.*, 2012), ou seja, 20%. A cinza volante foi adquirida, em doação, de uma cimenteira catarinense, da região Sul do Brasil.

Na obtenção dos FNMs, o primeiro passo foi a separação física dos resíduos. Esse método foi utilizado por ser relativamente simples, prático e ter baixo custo de energia e investimentos em equipamentos (MARQUES, MARRERO e MALFATTI, 2013).

Para realizar a separação física foram utilizadas técnicas convencionais de separação desses tipos de resíduos. A primeira etapa dessas técnicas é esmagar o lixo eletrônico. Em seguida, magneticamente, a parte metálica é separada da parte não metálica (LUHAR e LUHAR, 2019). A Figura 3.8 (a) mostra o material triturado. A Figura 3.8 (b) mostra a parte não metálica dos PCIs já triturada e transformada em pó.



**Figura 3.8:** Placas de circuito impresso trituradas (a) e parte não metálica separada da parte metálica já triturada e transformada em pó

A parte não metálica, resultante da britagem e separação física, correspondeu a aproximadamente 44% do total do *e-waste* processado. Em outras palavras, este presente trabalho identificou que os PCIs utilizados eram compostos por aproximadamente 44% de materiais não metálicos.

Foi realizado o ensaio de granulometria da parte não metálica triturada e pulverizada. Para isso foram utilizadas duas amostras. A primeira amostra foi de 331,9 g. A segunda de 392,2 g. O resultado da granulometria da FNMs é mostrado na Tabela 3.3 e indicou que 82% da parte não metálica e triturada passou pela peneira com abertura de 4,75 mm, mas ficaram retidos na peneira de abertura de 150  $\mu\text{m}$ . Assim, 82% da parte não metálica utilizada neste trabalho pode ser classificada como agregado fino (GARCIA, BARRETO e CRISPIM, 2018).

**Tabela 3.3:** Resultado dos testes de granulometria para amostras de *e-waste*

Peneira	% retida (amostra 1)	% retida (amostra 2)	% retida (média)	% média acumulada retida	% passada pela peneira
12,50 mm	00,0	00,0	00	00,0	100
09,50 mm	00,0	00,0	00	00,0	100
06,30 mm	00,0	00,0	00	00,0	100
04,75 mm	00,0	00,0	00	00,0	100
02,36 mm	00,1	00,1	00	00,1	100
01,18 mm	01,1	01,2	01	01,2	099
600 µm	34,1	35,3	35	35,9	064
300 µm	27,4	26,7	27	62,9	037
150 µm	19,3	18,5	19	81,8	018

A parte não metálica triturada de PCI será utilizada como substituto de parte dos agregados graúdos e finos. Assim, a partir daqui, a parte não metálica de PCI será designada, simplesmente, por *e-waste*

O objetivo deste trabalho é investigar a substituição parcial de agregados graúdos e / ou finos por *e-waste* e a substituição, em 20%, do cimento *Portland* por cinzas volantes. Dessa forma, a quantidade total de componentes não será alterada, mas a proporção de alguns de seus componentes sim. Assim, os resultados dos experimentos realizados por este presente trabalho serão dependentes apenas das proporções dos componentes participantes de cada experimento e não da quantidade total de cada experimento, sendo caracterizado como um experimento de mistura (CORNELL, 1990).

Nos experimentos realizados neste presente trabalho foi imposto um limite inferior para os componentes do pó de pedra e da brita. A razão dessa imposição é que, para ser caracterizado como concreto, é necessária a participação desses componentes na mistura (ABNT, 2015).

Um limite máximo de substituição também foi imposto para a parte não metálica de PCI triturado. Esse limite é de 15% do total de agregados. Esse limite levou em consideração que a maioria dos trabalhos que investigam substituições de agregados naturais por agregados reciclados fazem essa substituição em, no máximo, 15%, como estabelecem (GRILLO, 2014), (SAMPAIO, SOUZA e GOUVEIA, 2014) e (FIORITI, INO e AKASAKI, 2010). Também corrobora para a adoção desse limite, os resultados dos testes do experimento preliminar. Esses ensaios mostraram que para ser classificado como concreto estrutural pela Norma ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015), o percentual de substituição do agregado graúdo por *e-waste* deve ser inferior a 50% e próximo a 7,5%. Assim, o experimento é caracterizado como um experimento de mistura com restrições para alguns fatores.

Diante do exposto no parágrafo anterior, este trabalho optou por utilizar o *design* de mistura de vértices extremos. A razão é que este *design* foi desenvolvido com o objetivo de realizar experimentos com misturas, quando vários componentes apresentam alguma restrição (MCLEAN e ANDERSON, 1966), como é o caso deste presente estudo. Além de o projeto de vértices extremos ser um método utilizado em experimentos de mistura quando existem algumas restrições a alguns componentes (ZAHIRI e ESKANDARI-NADDAF, 2019), este projeto tem mostrado bom desempenho na análise da correlação entre as variáveis investigadas e os resultados (ZHANG *et al.*, 2015). Por trabalhar com três componentes, optou-se por utilizar o projeto de vértice extremo de segundo grau, visto que, para até cinco componentes, este modelo apresenta um bom desempenho (SNEE, 1973).

Em qualquer experimento com misturas cada tratamento corresponde a uma combinação dos componentes (LEMA e CASTILHO, 2018). No caso do presente trabalho, o objetivo é investigar o comportamento da mistura em relação a quatro componentes: pó de pedra, brita 1, *e-waste* e cinza volante. No entanto, a cinza volante terá uma porcentagem fixa em todas as misturas. Desta forma, os componentes cinza volante, água, cimento *Portland* e aditivo apresentam valores constantes em todos os tratamentos. Assim, utilizando a nomenclatura do experimento com misturas, os componentes pó de pedra, brita 1 e *e-waste* serão denominados  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , respectivamente. Em cada tratamento, a participação dos componentes  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , conforme justificado anteriormente, deve respeitar as restrições apresentadas na Tabela 3.4.

Vale ressaltar que os limites definidos na Tabela 3.3 referem-se a traços para a produção de cinco corpos-de-prova.

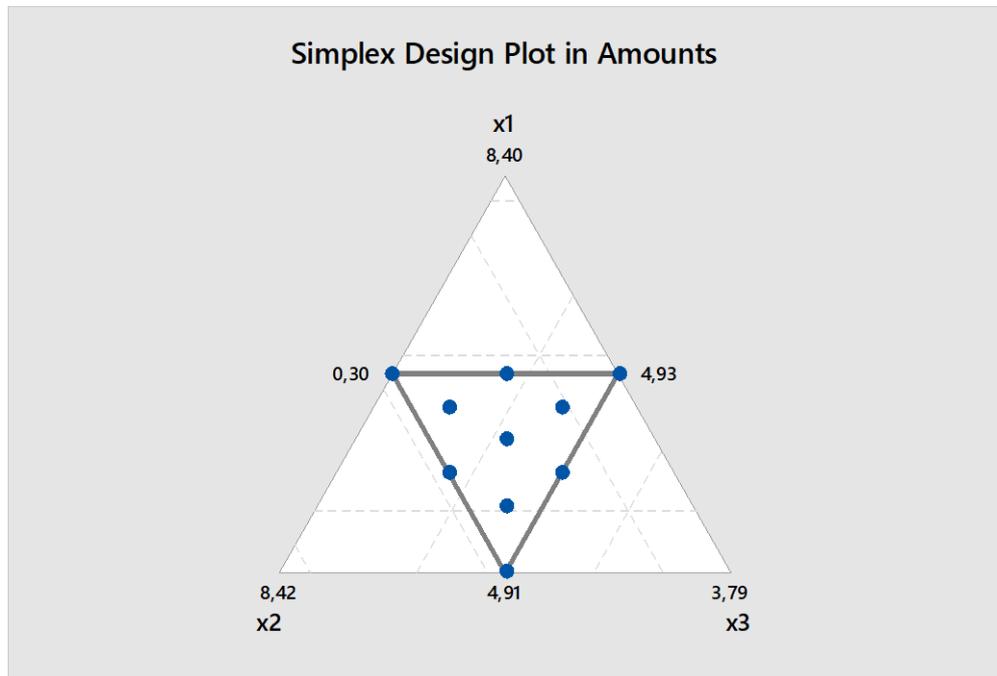
**Tabela 3.4:** Níveis para os fatores investigados neste trabalho

Componente	Mínimo	Máximo
$x_1$	0,61818 kg	6,65144 kg
$x_2$	0,68150 kg	6,67856 kg
$x_3$	0,00000 kg	2,04450 kg

O *design* experimental produzido com o auxílio do *software Minitab*, baseado nos traços do tópico anterior e no *design* de mistura de vértices extremos, usando três repetições, é mostrado na Tabela 3.5

A Figura 3.9 mostra o *design simplex* para o projeto experimental de vértices extremos para as misturas utilizadas neste presente trabalho. Analisando a Figura 3.9 pode-se observar que o *design* dos vértices extremos é uma sub-região menor dentro do simplex (ZAHIRI e

ESKANDARI-NADDAF, 2019) e a área experimental pode ser composta de polígonos de várias formas (DING *et al.*, 1999).



**Figura 3.9:** Design Simplex para o planejamento experimental

Dois conjuntos de corpos de prova foram produzidos usando o *design* experimental apresentado na Tabela 3.5. O primeiro conjunto de corpos de prova foi produzido apenas com cimento *Portland* como aglutinante. Para produzir este conjunto de corpos de prova foi utilizado o mesmo traço de controle do experimento preliminar. No segundo conjunto de corpos de prova, 20% do cimento *Portland* foi substituído por cinzas volantes. Assim, o traço de controle para este conjunto de corpos de prova foi baseado no mesmo traço de controle do primeiro grupo de corpos de prova, com a substituição de 20% do cimento *Portland* por cinzas volantes.

**Tabela 3.5:** Projeto experimental, usando experimento de mistura, vértices extremos (em kg)

Traço	Pó de brita ( $x_1$ )	Brita 01 ( $x_2$ )	<i>E-waste</i> ( $x_3$ )
01	4,90694	6,67856	2,04450
02	6,65144	4,93406	2,04450
03	6,65144	6,67856	0,30000
04	5,77919	6,67856	1,17225
05	6,65144	5,80631	1,17225
06	5,77919	5,80631	2,04450
07	6,06994	6,09706	1,46300
08	5,48844	6,38781	1,75375
09	6,36069	5,51556	1,75375
10	6,36069	6,38781	0,88150

Para a mistura no estado fresco, foi realizado o teste de slump, conforme mostrado na Figura 3.10. Não foram feitas réplicas para esse teste porque é um teste complementar, que auxilia na classificação do concreto, mas não é determinante para classificar se o concreto é ou não estrutural. Além disso, vários trabalhos como (XIONG *et al.*, 2020), (LO, CUI e LI, 2004), (LACASA, SANTOLAYA e BIEDERMANN, 2016) e (SOLTANZABEH, CUNHA e BARROS, 2019), não produzem réplica para esse tipo de teste.



**Figura 3.10:** Teste de *slump* para o traço 06 sem substituir o cimento *Portland* por cinzas volantes

Em seguida, os ensaios de resistência à compressão foram realizados nos corpos de prova do experimento principal.

Também foi realizada uma Microscopia Eletrônica de Varredoura (MEV) nas amostras de concretos cujas resistências os permitia classificá-los como concreto estrutural. A Figura 3.11 mostra as amostras preparadas.



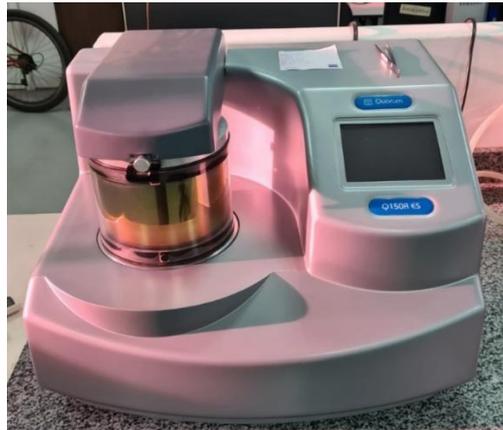
**Figura 3.11:** Amostras de concreto preparadas para ensaio de MEV

Depois de serem preparadas as amostras ficaram em uma estufa, à 50°C, por 48 horas (Figura 3.12).



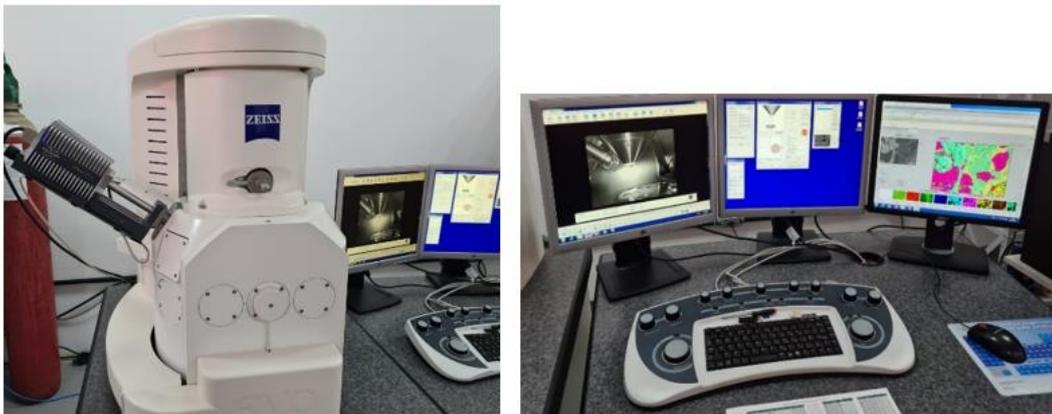
**Figura 3.12:** Estufa contendo as amostras de concreto cuja resistência o classifica como concreto estrutural

A Figura 3.13 mostra os corpos de prova dos concretos sendo preparadas, com banho de ouro, para a realização da MEV.



**Figura 3.13:** Preparo, com banho de ouro, das amostras de concreto para a realização da MEV

A Figura 3.14 mostra os equipamentos utilizados para a realização da MEV nos corpos de prova de concreto. O equipamento é um MEV, modelo EVO 10, da marca Zeiss. A foto da esquerda mostra a câmara de vácuo, onde é feita a varredura das amostras. A foto da direita mostra o *SmartSem touch UI*, que é o processador das imagens geradas pelo processo de MEV.



**Figura: 3.14:** Equipamento utilizado para a realização da MEV (à esquerda) e equipamento utilizado para analisar os resultados da MEV (à direita)

Além da MEV foram realizados ensaios de lixiviação nos corpos de prova cujas resistências os caracterizam como concreto estrutural. Esses ensaios foram realizados porque a análise de lixiviação é uma das formas de avaliar o impacto ambiental dos materiais de construção e demolição, principalmente quando estão em contato com o solo e águas subterrâneas (MIKAMI, 2017).

O procedimento utilizado para fazer os ensaios de lixiviação foi a metodologia Italiana. Este presente trabalho optou por utilizar a metodologia Italiana por ser um procedimento que permite a análise do concreto na forma monolítica, ou seja, em forma de blocos como são utilizados em condições reais. Dessa forma, o material não necessita ser triturado, o que interfere no processo de lixiviação (MIKAMI, 2017). Seguindo essa metodologia, o corpo de prova foi imerso em recipientes contendo água ultrapura, conforme mostrado na Figura 3.15. As amostras de concreto foram imersas em água com 60 dias de idade, visto que a metodologia recomenda a realização do ensaio após o período mínimo de um mês após seu preparo.



**Figura 3.15:** Preparação das amostras de concreto cujas resistências o classifica como concreto estrutural para ensaios de lixiviação

A água dos recipientes foi coletada nos períodos de 24, 72, 168 e 384 horas, sendo totalmente substituída por um novo volume de água ultrapura no final de cada um dos períodos. As águas coletadas foram utilizadas para a determinação dos parâmetros do lixiviado.

Este presente trabalho realizou dois ensaios, utilizando a água coletada nos períodos supramencionados. O primeiro ensaio foi para identificar o nível de pH da água. Esse ensaio foi realizado no equipamento mostrado na Figura 3.16. O equipamento é um medidor de pH em mV de bancada, modelo mPA210, fabricado pela MS TECNOPON Instrumentação Científica. O equipamento trabalha na faixa de medição de -2,000 a 20,000 (pH) e -1999,9 a +1999,9 (mV), com resoluções máximas de  $\pm 0,001$  pH e  $\pm 0,1$  mV e precisão de leitura de  $\pm 0,005$  para o pH e de  $\pm 0,2$  para a mV.



Figura 3.16: Equipamentos utilizados para medir o pH da água das amostras do concreto cujas resistência o classifica como concreto estrutural

Outro ensaio realizado na água coletada das amostras de concreto foi o ensaio de para medir a condutividade elétrica. O equipamento utilizado para fazer o ensaio de condutividade elétrica é mostrado na Figura 3.17. O equipamento é um condutímetro, da marca Tecnopon, modelo mCA150. Para medir a condutividade na água, sua faixa de trabalho é de 0 a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , usando escalas de 0 a 2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 0 a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A resolução vai de 0,001  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 0,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Tem uma exatidão de 2% da escala com uma incerteza de 1% da escala.



**Figura 3.17:** Equipamento utilizado para medir a condutividade elétrica na água coletada das amostras de concreto

O software Minitab foi utilizado para fazer a análise estatística dos dados obtidos nos ensaios dos experimentos.

## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Experimento preliminar

O resultado do teste de *slump* é mostrado na Tabela 4.1. Seguindo a maioria dos trabalhos na área, como os trabalhos (XIONG *et al.*, 2020), (LO, CUI e LI, 2004), (LACASA, SANTOLAYA e BIEDERMANN, 2016) e (SOLTANZABEH, CUNHA e BARROS, 2019), o ensaio de *slump* é realizado em cada betonada, não sendo necessária fazer réplica nesse teste.

Na Tabela 4.1 as siglas para classificação são: S10 = ( $10 \leq slump < 50$ ); S50 ( $50 \leq slump < 100$ ); S100 = ( $100 \leq slump < 160$ ); S160 = ( $160 \leq slump < 220$ ); S220 = ( $slump \geq 220$ )(ABNT, 2015).

Para confeccionar os corpos de prova utilizando 100% de *e-waste* como agregado fino foi necessária apenas uma betonada. Já para as demais proporções de *e-waste* foram necessárias duas betonadas. Dessa forma, cada  $y_\mu$  representa o valor do teste de *slump* para uma betonada de concreto que foi utilizado para confeccionar os corpos de prova.

**Tabela 4.1:** *Slump* das amostras dos corpos de prova

<i>E-waste</i>	Pó de brita	<i>Slump</i> (mm) ( $y_\mu$ )	Média ( $\bar{y}$ )	Classificação (ABNT, 2015)
000,0%	100,0%	276 273	275	S220
007,5%	092,5%	257 265	261	S220
050,0%	050,0%	177 184	181	S160
100,0%	000,0%	152	152	S100

Analisando a Tabela 4.1, verifica-se que os concretos com 0% e 7,5% de substituição de pó de brita por *e-waste*, foram classificados como S220. Essa classificação caracteriza esses concretos como fluídos (ASTM, 2011), podendo serem utilizados como concreto extrusado, vibro-prensado ou centrifugado (ABNT, 2015). Já para os concretos compostos de 100% e 50% de *e-waste*, as classificações foram S100 e S160, respectivamente, caracterizando-os como mole (ASTM, 2011), tendo as mesmas aplicações do que os concretos com as porcentagens de 0% e 7,5% de substituição de pó de brita por *e-waste*.

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados para os testes de resistência para os corpos de prova.

Com os dados da Tabela 4.2 foi confeccionado o gráfico, mostrado na Figura 4.1, apresentando o comportamento, em relação à resistência, de acordo com a porcentagem de *e-waste* utilizada na produção do concreto. A linha linear mostra o comportamento esperado, considerando que os resultados seriam simples média aritmética da utilização dos componentes.

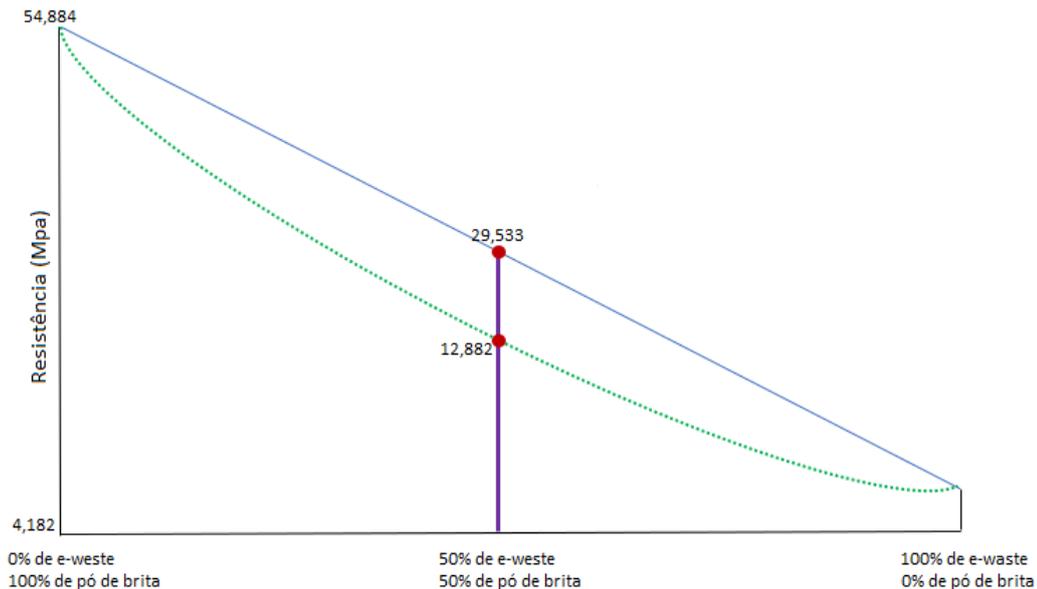
Por exemplo, o resultado esperado para o concreto utilizando 50% de *e-waste* e 50% de pó de brita, como agregados, é a média aritmética dos resultados dos concretos que utilizaram 100% de *e-waste* e 100% de pó de brita, respectivamente, como agregados. Já a curva pontilhada mostra o comportamento real das amostras.

**Tabela 4.2:** Resultado do ensaio de resistência feito nos corpos de prova

<i>E-waste</i>	Pó de brita	FCK (Mpa) ( $y_{\mu}$ )								Média( $\bar{y}$ )	Desvio Padrão
000,0%	100,0%	56,443	52,617	57,035	58,000	53,088	61,949	55,723	54,884	3,33026	
		55,691	53,094	49,109	58,136	53,393	51,541	57,550			
		53,412	57,780	53,323	51,687	57,595	59,091	48,007			
		54,883	51,776	59,715	53,030	56,175	49,987				
		57,175	58,894	53,972	49,618	54,017	54,355	55,532			
		52,820	59,607								
007,5%	092,5%	22,568	30,666	20,117	22,562	25,325	18,717	24,847	23,318	2,926	
		25,159	21,333	19,029	25,891	22,600	25,649	21,161			
		21,760	27,585	23,720	27,693	23,695	21,823	21,823			
		26,184	19,277	25,656	24,026	20,722	29,730	20,174			
		24,134	22,715	22,498	22,224	26,413	22,212	19,016			
		20,601	23,472								
050,0%	050,0%	13,929	12,981	12,732	14,821	14,241	10,364	10,912	12,882	1,525	
		11,727	13,089	13,051	12,643	14,133	11,427	13,636			
		13,515	14,324	13,846	13,999	11,924	10,141	14,018			
		14,114	13,044	11,561	10,485	11,173	16,310	14,120			
		14,661	12,465	14,146	12,592	10,186	10,460	12,051			
		12,535	13,967	13,636	10,135	13,083	14,400	14,470			
100,0%	000,0%	1,687	4,425	2,979	4,539	5,157	4,361	5,545	4,1818	1,3281	
		2,324	6,322	3,966	1,872	4,514	5,138	2,846			
		5,736	3,298	3,234	5,640	6,035	4,985	2,890			
		5,755	3,342	6,264	4,431	4,539	3,056				

No gráfico da Figura 4.1 é possível verificar que a resistência medida para amostras com 50% de cada um dos dois componentes é, significativamente, menor do que a esperada, e o mesmo acontece com as demais proporções. Esse comportamento indica que os componentes são antagônicos, uma vez que a utilização dos componentes não melhoram a propriedade desejada (CORNELL, 1990).

Esses resultados do experimento preliminar, além de mostrar que existe uma viabilidade na utilização do *e-waste* como parte dos agregados na produção do concreto, foram usados para ajudar no planejamento experimental. O experimento preliminar indicou que concreto com uma substituição superior a 15%, provavelmente, não será classificado como estrutural. Como um dos principais objetivos deste presente trabalho é obter um concreto estrutural, no delineamento experimental foi fixado um limite máximo de 15% de substituição dos agregados naturais por *e-waste*.



**Figura 4.1:** Gráfico mostrando a resistência das amostras de concreto utilizando *e-waste* como parte dos agregados

## 4.2 Experimento principal

A Tabela 4.3 mostra os resultados do teste de abatimento para os corpos de prova dos experimentos. A principal propriedade do concreto identificada por esse teste é a trabalhabilidade do concreto. Propriedade esta que tem um impacto significativo na resistência final do concreto (ROYCHAND *et al.*, 2020).

**Tabela 4.3:** Resultado do teste de abatimento para experimentos com e sem a substituição de 20% do cimento *Portland* por cinzas volantes

Quantidade dos componentes (kg)	Resultados						
	Com cinza volante			Sem cinza volante			
	Traço	$x_1$	$x_2$	$x_3$	<i>Slump</i> (mm)	Classificação (ABNT, 2015)	<i>Slump</i> (mm)
01	4.907	6.679	2.0445	085	S50	045	S10
02	6.651	4.934	2.0445	175	S160	030	S10
03	6.651	6.679	0.3000	280	S220	280	S220
04	5.779	6.676	1.1720	270	S220	280	S220
05	6.651	5.807	1.1720	270	S220	280	S220
06	5.780	5.806	2.0445	050	S50	015	S10
07	6.070	6.097	1.4630	223	S220	235	S220
08	5.488	6.388	1.7540	201	S160	220	S220
09	6.361	5.516	1.7540	220	S220	216	S160
10	6.361	6.388	0.8820	255	S220	280	S220

A maioria das misturas apresentou o valor de abatimento que o classifica como S220. Essa classificação permite que o concreto, produzido com essa característica, seja utilizado como um elemento estrutural delgado ou com alta densidade de armadura (ABNT, 2015).

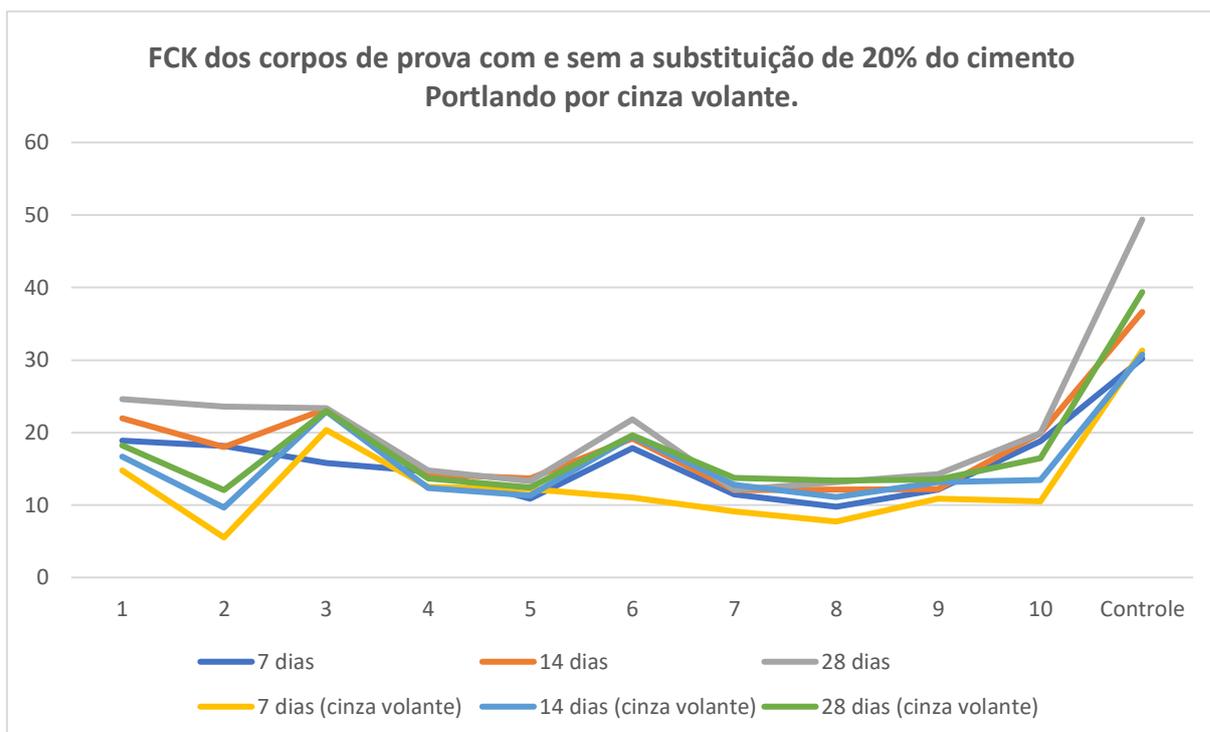
A Tabela 4.4 mostra os resultados dos ensaios de resistência à compressão para os corpos de prova dos experimentos. Os testes foram realizados após 7, 14 e 28 dias de cura.

**Tabela 4.4:** Resultados dos testes de resistência à compressão

Traço	Quantidade dos componentes (kg)			Resistência à compressão (MPa)					
				Com cinza volante			Sem cinza volante		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	7 days	14 days	28 days	7 days	14 days	28 days
Controle	5,08000	8,55000	0,00000	31,315	30,761	39,373	30,208	36,631	49,370
01	4,90694	6,67856	2,04450	14,77	16,699	18,191	18,849	21,963	24,637
02	6,65144	4,93406	2,04450	5,532	9,651	12,064	18,163	17,991	23,614
03	6,65144	6,67856	0,30000	20,314	22,944	23,010	15,814	23,313	23,329
04	5,77919	6,67856	1,17225	12,497	12,338	13,636	14,63	14,267	14,735
05	6,65144	5,80631	1,17225	12,236	11,319	12,450	10,893	13,694	13,301
06	5,77919	5,80631	2,04450	11,033	19,491	19,650	17,819	19,179	21,804
07	6,06994	6,09706	1,46300	9,135	12,790	13,738	11,478	12,058	12,113
08	5,48844	6,38781	1,75375	7,741	11,109	13,397	09,766	12,147	13,161
09	6,36069	5,51556	1,75375	10,867	13,187	13,558	12,147	12,210	14,228
10	6,36069	6,38781	0,88150	10,511	13,452	16,435	18,831	19,933	19,879

Um corpo de prova, de cada traço, foi utilizado para os testes de resistência à compressão, para os tempos de cura de 7 e 14 dias. Para realizar o teste de resistência à compressão em corpos de prova com 28 dias de cura, 3 corpos de prava foram usados para cada traço. Assim, o resultado da resistência à compressão para cada experimento, com 28 dias de cura, indica a média aritmética das resistências à compressão dos três corpos-de-prova.

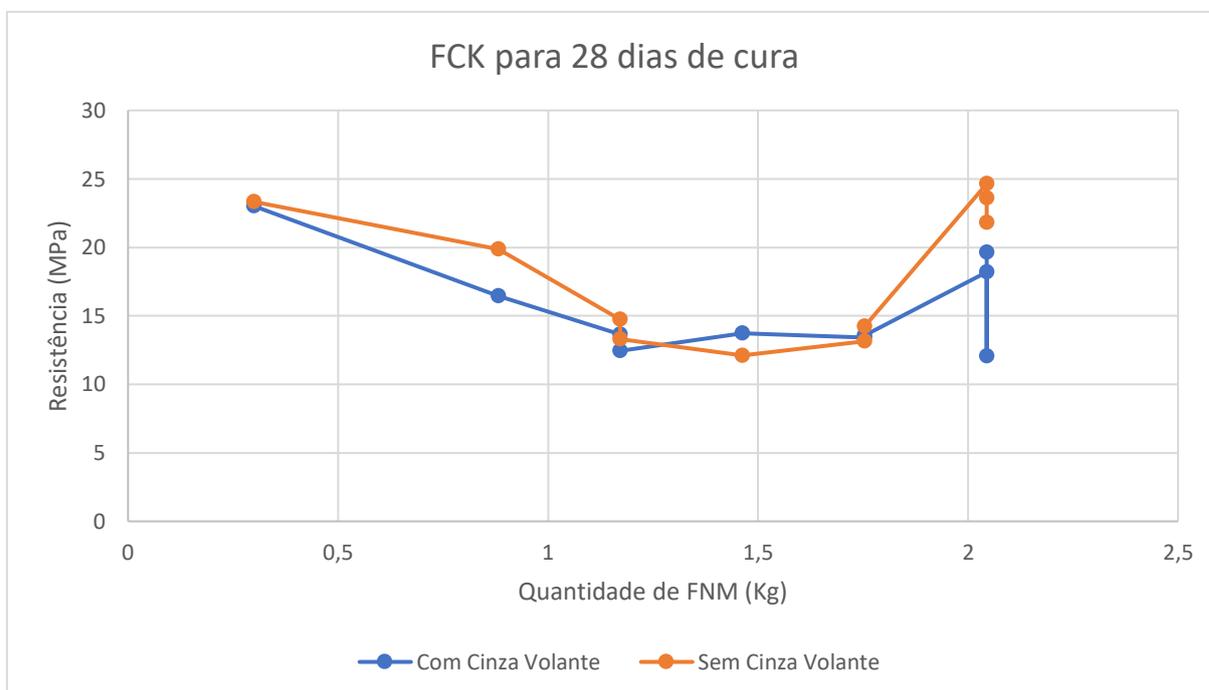
A Figura 4.2 mostra o gráfico produzido com os resultados dos ensaios de resistência à compressão para os corpos-de-prova produzidos sem substituição do cimento *Portland* e com substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. A análise desse gráfico sugere não haver diferença no comportamento, em relação à resistência à compressão, dos traços que utilizam a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante, com os traços que não usaram essa substituição. A análise desse gráfico sugere que a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante, não altera o comportamento da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo.



**Figura 4.2:** Resistência à compressão dos corpos de prova dos experimentos utilizando a substituição de 20% do cimento *Portland* por cinza volante e sem a substituição

A Figura 4.3 mostra os dados da Figura 4.2 com duas alterações. A primeira é a eliminação dos traços controles. A segunda é que os dados são dispostos em ordem crescente de quantidade de FNM nos traços. Com os dados nessa disposição percebe-se que à medida que a quantidade de FNM em substituição aos agregados naturais aumenta, diminui a resistência à compressão do concreto. Isso está de acordo com alguns trabalhos encontrados na literatura, indicando que há uma diminuição na resistência do concreto, à medida que há substituição de partes da matéria prima natural por material polimérico. Trabalhos como o de (Sofi, 2018), relatando que a resistência à compressão de concreto que substituiu em 20% os agregados naturais por borracha, diminuiu em mais de 50%. Também (MUHAMMAD, 2018) mostrou resultados semelhantes. No entanto, à partir de uma substituição superior a 1,5 kg ( $\approx 11\%$ ) de agregados naturais pela FNM, a resistência à compressão do concreto aumenta. Esse incremento na resistência é maior para os traços que não utilizaram cinza volante. Analisando apenas os traços que utilizaram cinza volante, verifica-se que a resistência à compressão para o concreto foi maior nos traços que utilizaram a quantidade máxima estipulada pelo delineamento experimental para a FNM (2,0445 kg – 15%) e a FNM substituiu mais o agregado fino do que o graúdo. Já o traço com cinza volante, usando a quantidade de 2,0445 kg da FNM substituindo em menor quantidade o agregado fino e em maior quantidade o agregado graúdo, teve a menor resistência à compressão. Já para os traços que não utilizaram a cinza volante, as maiores

resistências foram obtidas nos traços que utilizaram 20,0445 kg da FNM como agregados natutais. Essas informações sugerem que é viável a substituição de agregados naturais pela FNM por porcentagens maiores que 15% do total de agregados naturais na produção de concreto.



**Figura 4.3:** FCK para corpos de prova com 28 dias de cura ordenados por quantidade, crescente, de substituição de parte dos agregados naturais pela FNM

Os resultados da análise do experimento de mistura realizado pelo software *Minitab* são apresentados a seguir. Essa análise não utilizou as informações dos ensaios de *slump*, pois como já foi mencionado anteriormente, é um ensaio complementar, e o foco deste presente trabalho é fazer uma modelagem para a resistência à compressão do concreto. Seguindo grande parte dos trabalhos dessa área, como os trabalhos (XIONG *et al.*, 2020), (LO, CUI e LI, 2004), (LACASA, SANTOLAYA e BIEDERMANN, 2016) e (SOLTANZABEH, CUNHA e BARROS, 2019), nessa modelagem foram utilizados os dados dos corpos de prova com 28 dias de cura. Os demais corpos de prova (7 e 14 dias) foram produzidos apenas para obter uma antecipação das tendências e, se necessário, fazer ajustes nos experimentos.

A Figura 4.4 mostra a estimativa dos coeficientes de regressão para o tempo de cura de 28 dias. A Figura 4.5 mostra o Sumário do modelo para amostras com 28 dias de cura. Essa análise não utilizou as informações dos ensaios de *slump*, pois como já foi mencionado anteriormente, é um ensaio complementar, e o foco deste presente trabalho é fazer a modelagem para a resistência à compressão do concreto.

Sem cinza volante						Com cinza volante					
Coeficientes de Regressão Estimados para FCK						Coeficientes de Regressão Estimados para FCK					
Termo	EP de		Valor-T	Valor-P	VIF	Termo	EP de		Valor-T	Valor-P	VIF
	Coef	Coef					Coef	Coef			
PÓ DE BRITA	2602	1227	*	*	6159990,03	PÓ DE BRITA	-1631	1669	*	*	6394302,04
BRITA	-5532	1403	*	*	8123332,53	BRITA	-924	1902	*	*	8377916,27
E-WASTE	28770	3000	*	*	2519450,18	E-WASTE	16368	4035	*	*	2461232,78
PÓ DE BRITA*BRITA	5931	833	7,12	0,000	559764,53	PÓ DE BRITA*BRITA	5159	1121	4,60	0,000	573157,74
PÓ DE BRITA*E-WASTE	-61003	7157	-8,52	0,000	2725784,85	PÓ DE BRITA*E-WASTE	-29015	9631	-3,01	0,006	2664895,05
BRITA*E-WASTE	-16977	2624	-6,47	0,000	369563,51	BRITA*E-WASTE	-14366	3566	-4,03	0,001	368591,53
PÓ DE BRITA*BRITA*(-)	-18748	5329	-3,52	0,002	100930,76	PÓ DE BRITA*BRITA*(-)	-117	7231	-0,02	0,987	100179,88
PÓ DE BRITA*E-WASTE*(-)	48412	5389	8,98	0,000	155869,85	PÓ DE BRITA*E-WASTE*(-)	27578	7231	3,81	0,001	151807,46

**Figura 4.4:** Análise do experimento, para corpos de prova com 28 dias de cura, realizada por meio do software Minitab

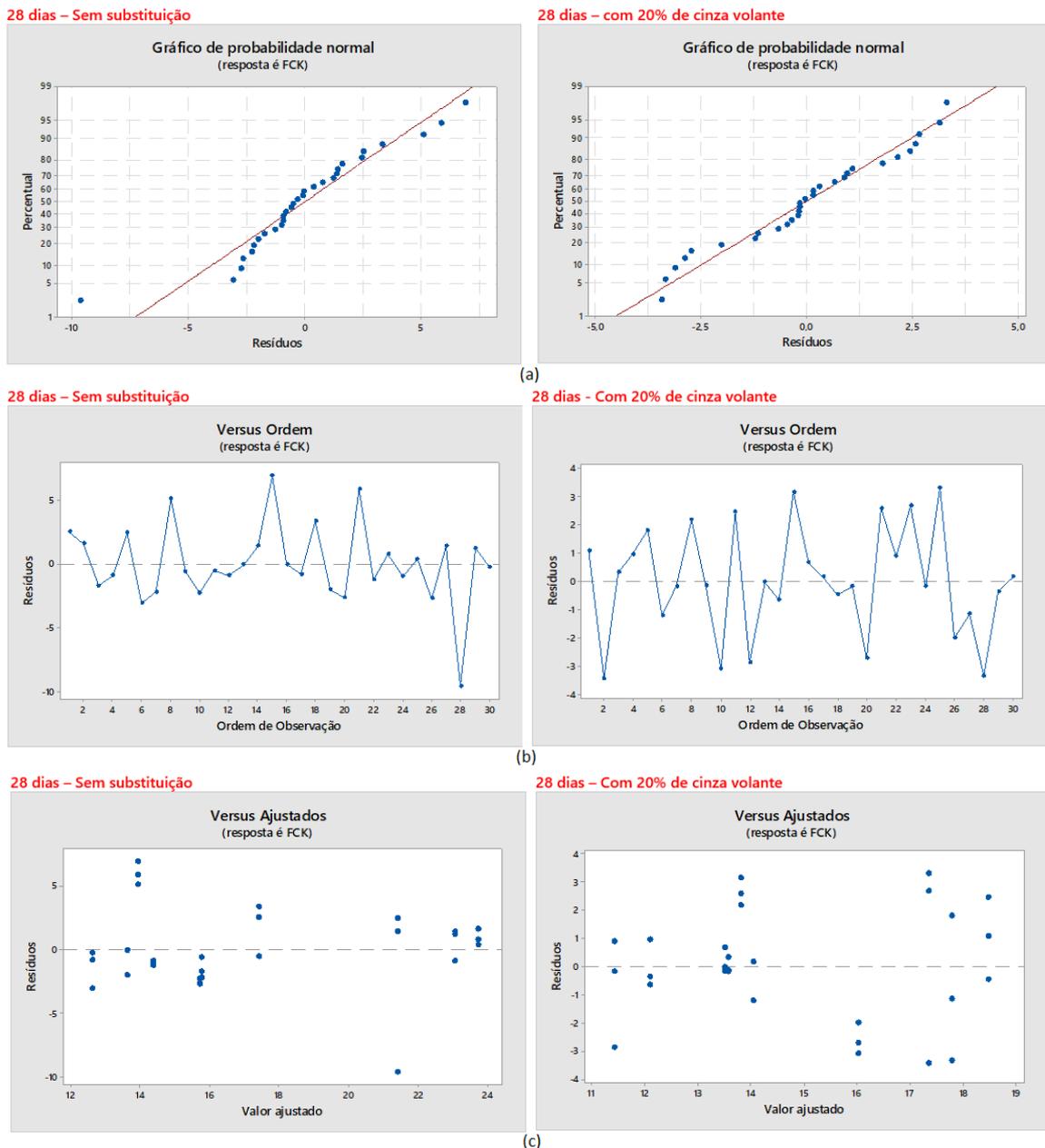
A análise dos coeficientes de regressão (Figura 4.4), mostra que há coeficientes positivos para duas combinações, tanto para os traços que utilizaram a cinza volante, quanto para os traços que utilizara apenas o cimento *Portland*. A primeira combinação é a de pó de brita e brita. Esse resultado é natural, uma vez que esses componentes são obrigatórios como agregados na produção de concreto. A segunda combinação é a dos componentes pó de brita e *e-waste* (FNM).

Ao analisar a Figura 4.5, pode-se observar que o R2 ajustado para corpos de prova com 28 dias de cura, tem valor de 94,41% e 71,90% para misturas que usaram apenas o cimento *Portland* e para as que usaram cinza volante, respectivamente. Isso significa que o modelo explica 94,41% e 71,90% da variação da resistência à compressão dos corpos de prova, para misturas com apenas cimento *Portland* e com substituição de 20% do cimento *Portland* por cinza volante, respectivamente.

Sem cinza volante					Com cinza volante				
Sumário do Modelo					Sumário do Modelo				
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)
1,18663	95,81%	94,41%	52,4068	92,57%	1,61616	78,68%	71,90%	121,417	54,96%

**Figura 4.5:** Sumário do modelo para amostras com (de cima para baixo): 7, 14 e 28 dias de tempo de cura

A Figura 4.6 mostra os gráficos residuais produzidos pelo software Minitab.



**Figura 4.6:** Gráficos residuais para analisar projeto de mistura para amostras com 28 dias de tempo de cura. O gráfico (a) é o gráfico de probabilidade normal de resíduos. O gráfico (b) é o gráfico de resíduos versus ordem. (c) é resíduos versus ajustes

Analisando o gráfico de probabilidade normal dos resíduos [Figura 4.6 (a)], verifica-se que as disposições dos pontos seguem, aproximadamente, uma linha reta, tanto para os traços que utilizaram cinza volante, como para os traço que não utilizam. A única exceção é um ponto no traço sem a utilização de cinza volante. Esse ponto provavelmente é um outlier. Essas observações indicam que os resíduos são normalmente distribuídos.

O gráfico de resíduos versus ordem mostra os resíduos na ordem em que os dados foram coletados [Figura 4.6 (b)]. Não observa-se nenhuma tendência na disposição dos pontos.

Novamente observa-se um provável outlier no traço sem cinza volante. Essas observações levam este presente trabalho a rejeitar a hipótese de que os resíduos não são independentes.

A Figura 4.6 (c) é o gráfico de resíduos versus ajustes. Este gráfico indica que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente e possuem variância constante, uma vez que os pontos que representam esses resíduos caem aleatoriamente em ambos os lados da linha 0 (zero), sem nenhum padrão reconhecível. Isso é verdadeiro tanto para os dados referentes aos experimentos que utilizaram a substituição de 20% de cimento *Portland* por cinza volante, quanto para os experimentos que não utilizaram essa substituição. Mais uma vez, observa-se um provável outlier no traço sem cinza volante.

A Figura 4.7 mostra os gráficos que fornecem as informações dos efeitos dos componentes nos traços para as amostras com um tempo de cura de 28 dias para os traços sem cinza volante [Figura 4.7 (a)] e com [Figura 4.7 (b)].

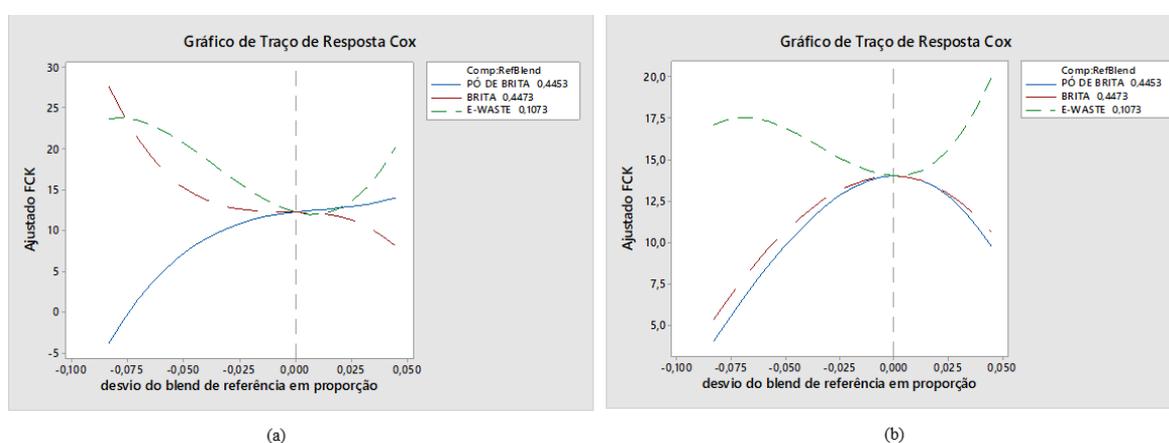


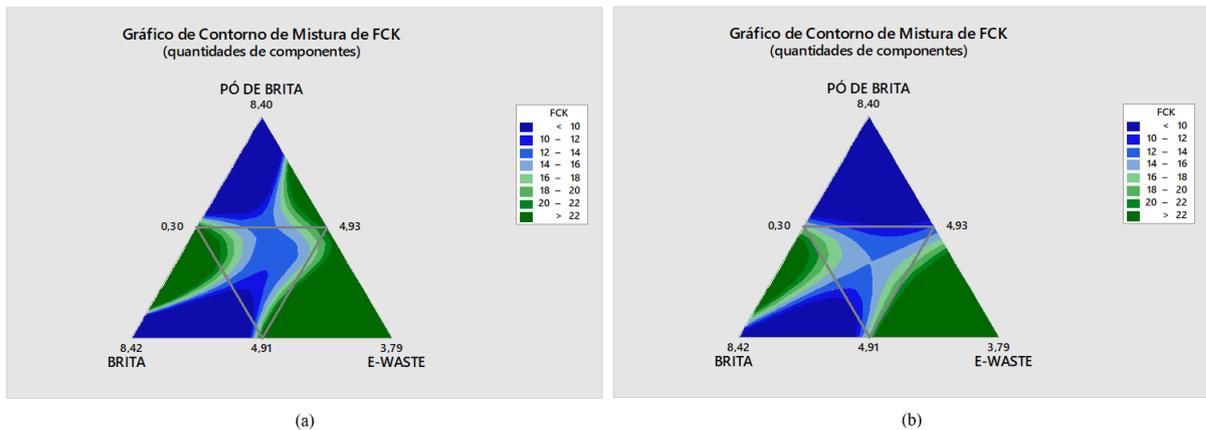
Figura 4.7: Gráfico fornecendo informações sobre os efeitos dos componentes, em relação à mistura de referência, para os traços sem cinza volante (a) e com (b)

Como foram impostos limites aos componentes da mistura, a mistura de referência, que é o centróide dos vértices do experimento, não é dada pelas proporções 0,333 para cada componente. Isso pode ser visto na Figura 4.7.

Ao analisar a Figura 4.7, pode-se observar que conforme a proporção de *e-waste* aumenta ou diminui em relação à mistura de referência, a resistência do concreto aumenta. Isso acontece nos ensaios para todos os corpos-de-prova dos experimentos. Tanto para os que substituíram 20% do cimento *Portland* por cinza volante, como para os experimentos que utilizaram apenas cimento *Portland* (Figura 4.7). Em outras palavras, aumentando ou diminuindo a proporção de *e-waste*, em relação ao traço de referênciam, na substituição de parte

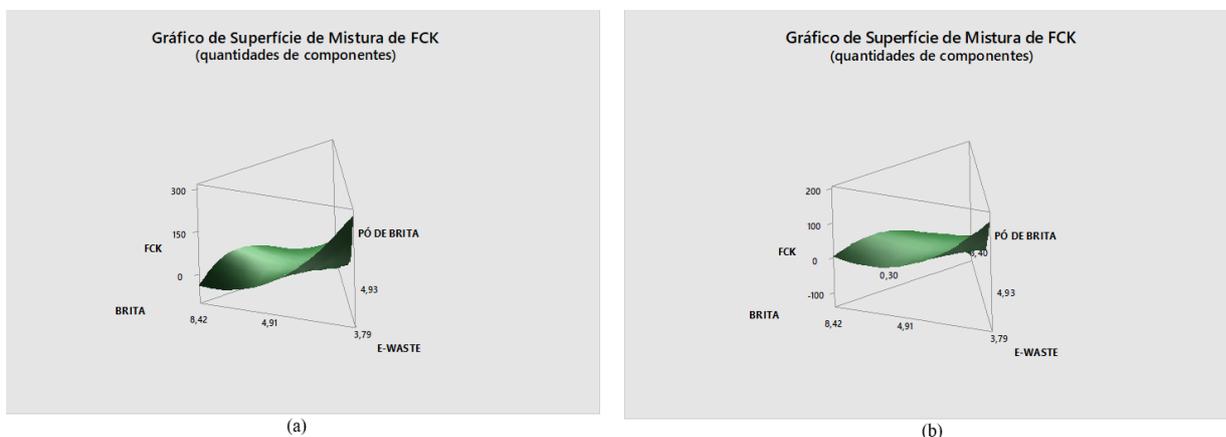
dos agregados naturais na produção de concreto, aumenta-se também a resistência à compressão desse concreto.

A Figura 4.8 mostra o gráfico de contorno para os dados relacionados aos ensaios de resistência à compressão realizados nos corpos de prova com 28 dias de tempo de cura para os traços sem cinza volante [Figura 4.8 (a)] e com [Figura 4.8 (b)].



**Figura 4.8:** Gráfico de contorno com os dados dos resultados do FCK para traços sem cinza volante (a) e com (b)

A Figura 4.9 mostra a representação gráfica da superfície de resposta, usando os dados dos resultados dos testes de resistência à compressão das amostras dos experimentos. Os gráficos são referentes aos corpos de prova com 28 dias de tempo de cura, para traços com cinza volante [Figura 4.9 (a)] e sem [Figura 4.9 (b)].



**Figura 4.9:** Superfície de resposta usando os resultados de FCK para corpos com 28 dias de cura para os traços sem cinza volante (a) e com (b)

Analisando as Figuras 4.8 e 4.9, verifica-se que para otimizar a resistência do concreto existem dois caminhos. O primeiro é diminuir a quantidade de *e-waste*, em relação ao traço de

referência. O segundo é aumentar a quantidade de *e-waste* em relação ao traço de referência. Como o principal objetivo deste presente trabalho é dar uma destinação ambientalmente correta para o *e-waste*, este presente trabalho indica o aumento da utilização do *e-waste*.

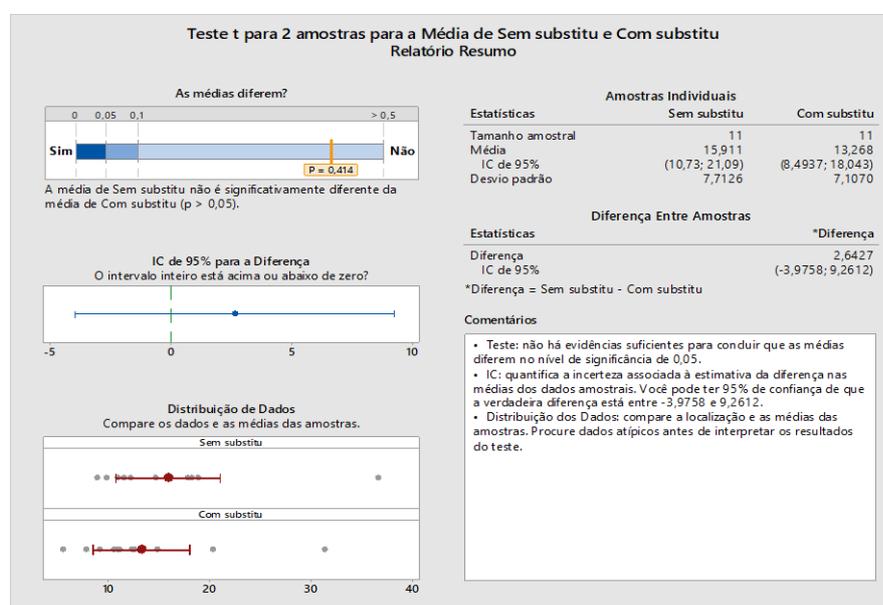
Usando os dados da Figura 4.4 foi definida a Equação (4.1). Essa equação é o modelo de regressão para os traços do experimento que não utilizaram cinza volante em suas misturas. Com pode ser visto na Figura 4.5, esse modelo tem uma precisão de 94,41%.

$$2602 x_1 - 5532 x_2 + 28770 x_3 + 5931 x_1 x_2 - 61003 x_1 x_3 - 16977 x_2 x_3 \quad [4.1]$$

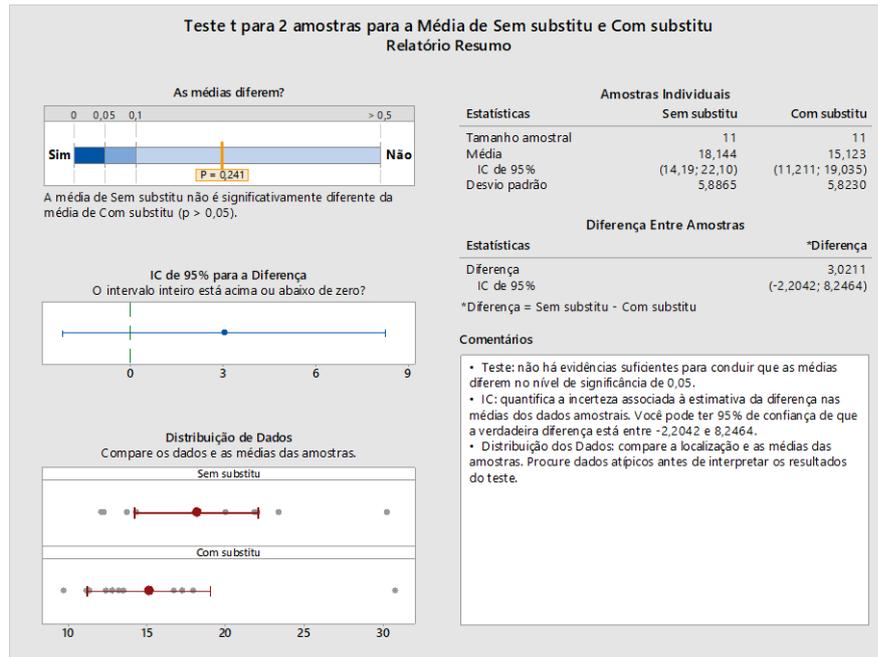
Também foi definida a Equação (4.2), usando os dados da Figura 4.4, para o modelo de regressão para os traços do experimento que utilizaram a cinza volante em suas misturas. Embora esse modelo tenha uma precisão bem menor do que o modelo da Equação (4.1), é um modelo aceitável, visto que sua precisão foi maior que 70%.

$$-1631 x_1 - 624 x_2 + 16368 x_3 + 5159 x_1 x_2 - 29015 x_1 x_3 - 14366 x_2 x_3 \quad [4.2]$$

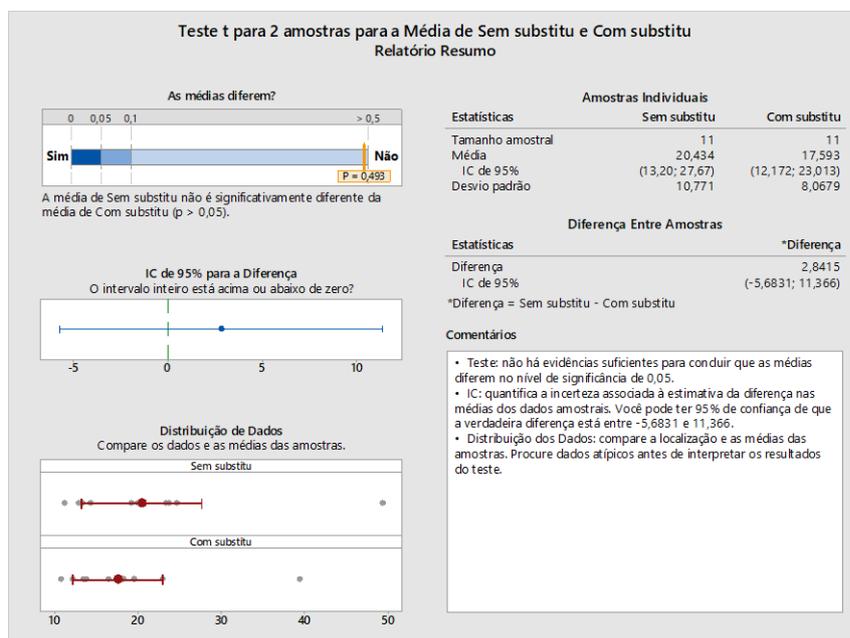
As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 mostram o resultado do teste de hipótese, sobre a média do FCK dos corpos-de-prova, produzidos com 20% de substituição do cimento *Portland* por cinza volante, ser igual à média do FCK dos corpos-de-prova produzidos sem essa substituição, para o tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, respectivamente.



**Figura 4.10:** Resultado do teste de hipótese sobre o FCK médio dos corpos de prova, com 7 dias de cura, produzido com a substituição de 20% do cimento Portland por cinza volante, ser igual à média do FCK dos corpos de prova produzidos sem essa substituição



**Figura 4.11:** Resultado do teste de hipótese sobre o FCK médio dos corpos de prova, com 14 dias de cura, produzido com a substituição de 20% do cimento Portland por cinza volante, ser igual à média do FCK dos corpos de prova produzidos sem essa substituição

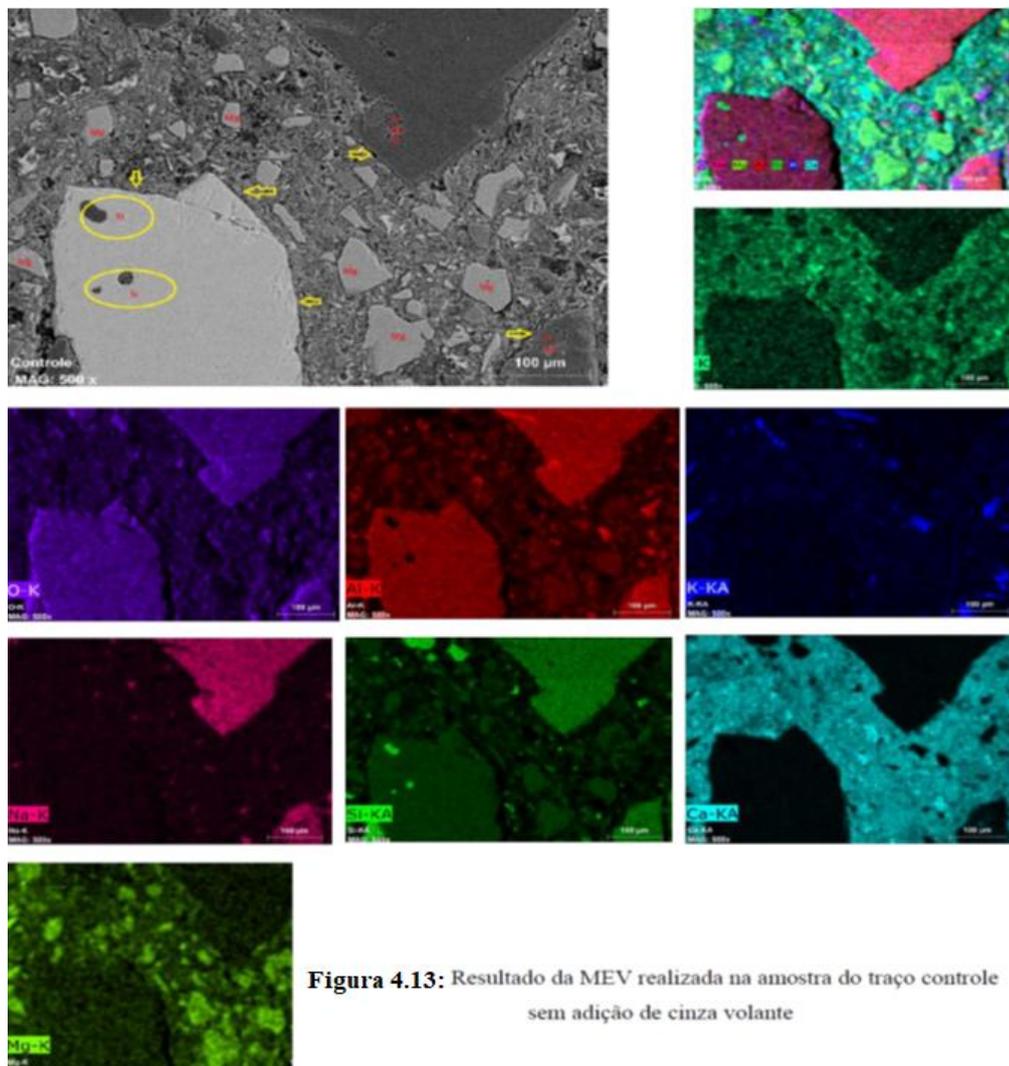


**Figura 4.12:** O resultado do teste de hipótese sobre o FCK médio dos corpos de prova, com 28 dias de cura, produzido com a substituição de 20% do cimento Portland por cinza volante, ser igual à média do FCK dos corpos de prova produzidos sem essa substituição

Ao analisar as Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, verifica-se que o valor P foi muito superior ao nível de significância de 0,05 para todos os tempos de cura. Assim não é possível rejeitar a hipótese nula de que as médias são iguais. Em outras palavras, a diferença entre as médias não é estatisticamente significativa. Outra informação relevante que pode ser observada nos resultados apresentados nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 é que, com intervalo de confiança de 95%,

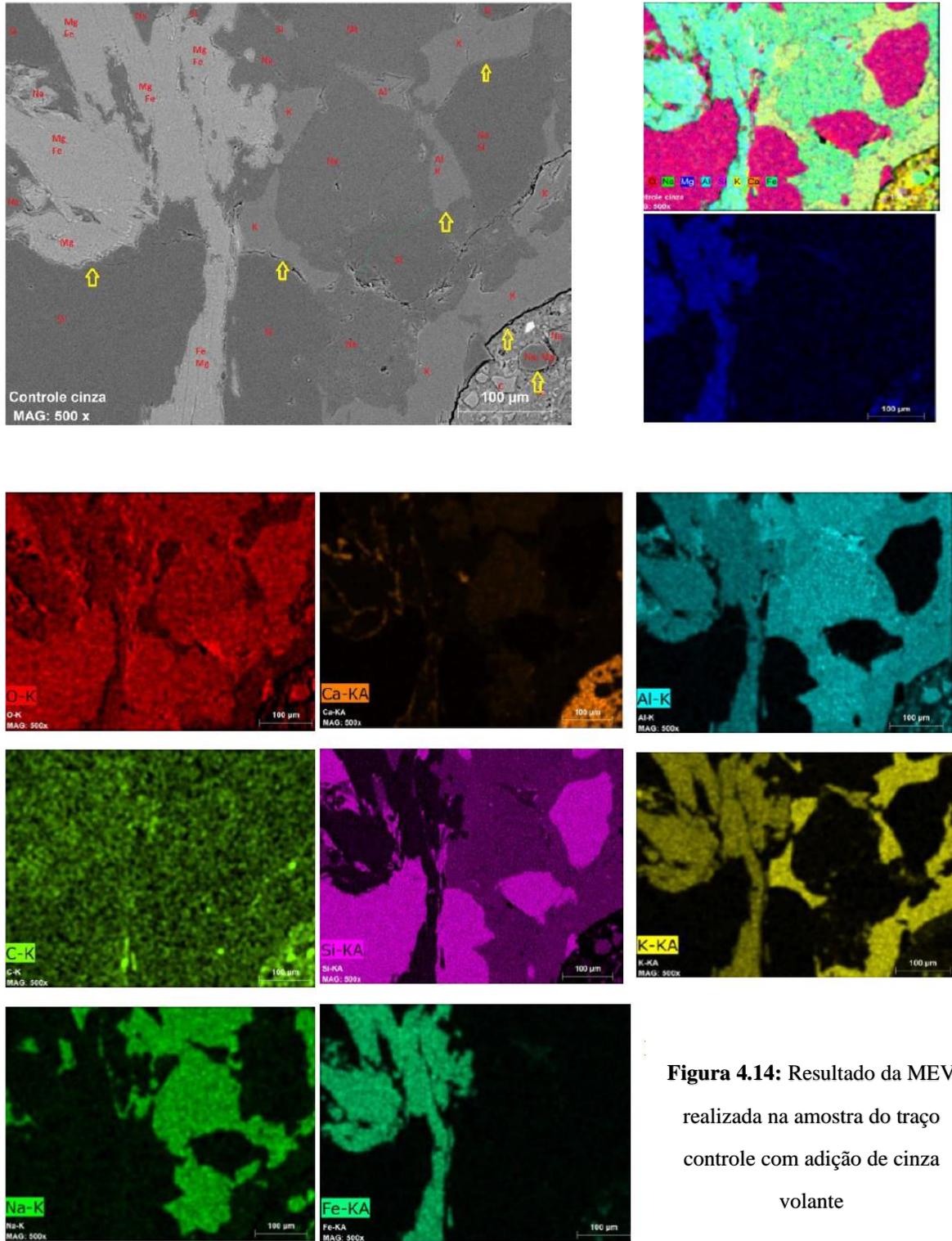
a diferença entre as médias pertence ao um intervalo contendo o zero, para todos os tempos de cura. Assim, é possível que a diferença seja zero, reforçando a hipótese de que as diferenças entre as médias não são estatisticamente significativas. Esses resultados do teste de hipótese reforçam a percepção da análise visual do gráfico apresentado na Figura 4.2, indicando que não há efeito negativo na substituição do cimento *Portland* por 20% por cinzas volantes.

A seguir estão os resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) realizada nas amostras cujos traços produziram corpos de prova que os classifica como concreto estrutural. A Figura 4.13 mostra a MEV na amostra do traço controle, sem a substituição de cimento *Portland* por cinza volante. Com o auxílio das imagens menores, onde são mostrados quais elementos químicos foram identificados na amostra, foi montada a imagem maior (primeira imagem). Nessa imagem maior é possível verificar que há uma quantidade significativa de metal (cinza mais claro). As setas amarelas mostram a área de aderência da massa cimentícia com os componentes (agregados).



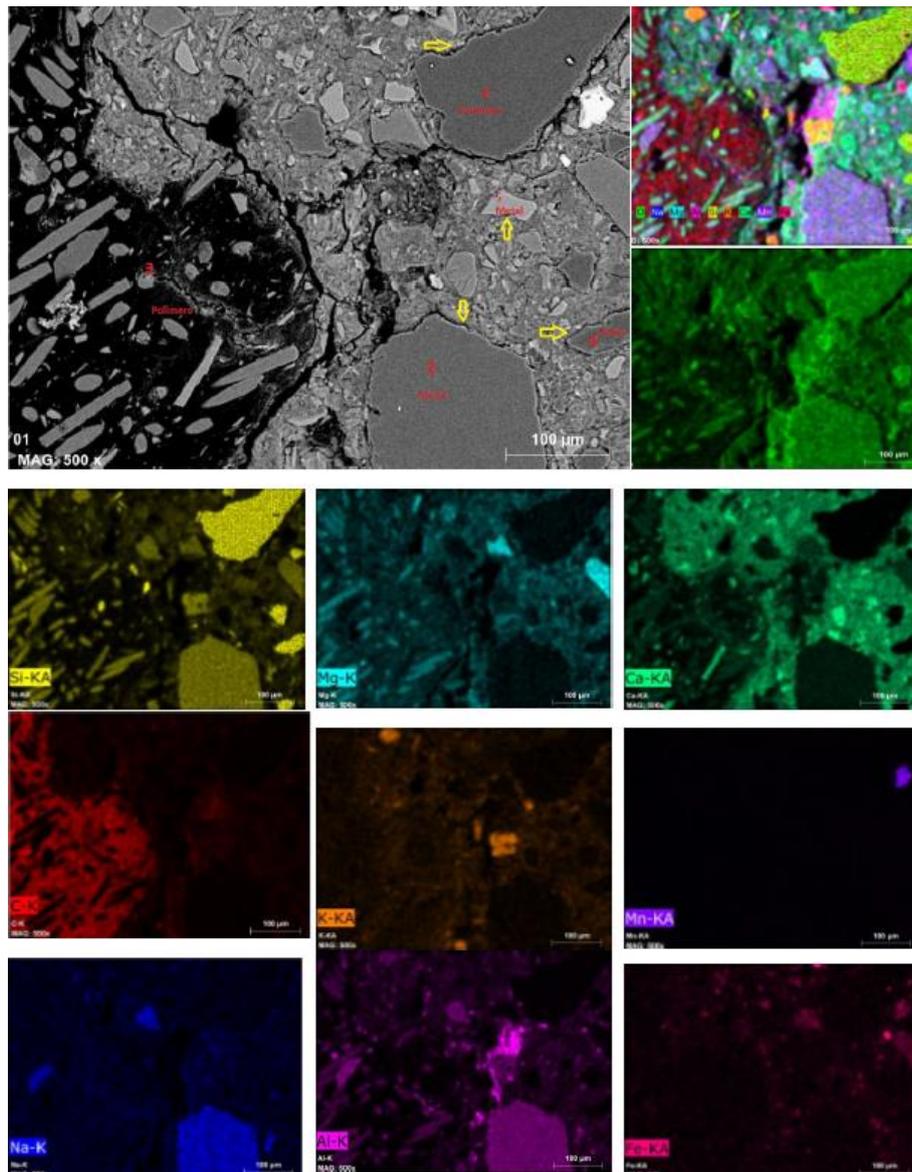
**Figura 4.13:** Resultado da MEV realizada na amostra do traço controle sem adição de cinza volante

A Figura 4.14 mostra a MEV na amostra do traço controle, com a substituição de cimento *Portland* por cinza volante. Com o auxílio das imagens menores, onde são mostrados quais elementos químicos foram identificados na amostra, foi montada a imagem maior (primeira imagem). Nessa imagem maior é possível verificar a presença de material metálico



**Figura 4.14:** Resultado da MEV realizada na amostra do traço controle com adição de cinza volante

(cinza mais claro). O restante dos componentes identificados são os usuais do concreto, como areia e massa cimentícia. Esse resultado é semelhante ao do traço controle sem a substituição de cimento *Portland* por cinza volante. A única diferença entre os resultados da MEV dos traços controle é que no que contém cinza volante foi identificado a presença do ferro. Como a cinza volante é resíduo de forno siderúrgico, é coerente que o traço controle com a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante, contenha o elemento Fe. As setas amarelas mostram a área de aderência da massa cimentícia com os componentes (agregados). Essas imagens indicam não haver diferença na aderência da massa cimentícia e os agregados nos traços controles.

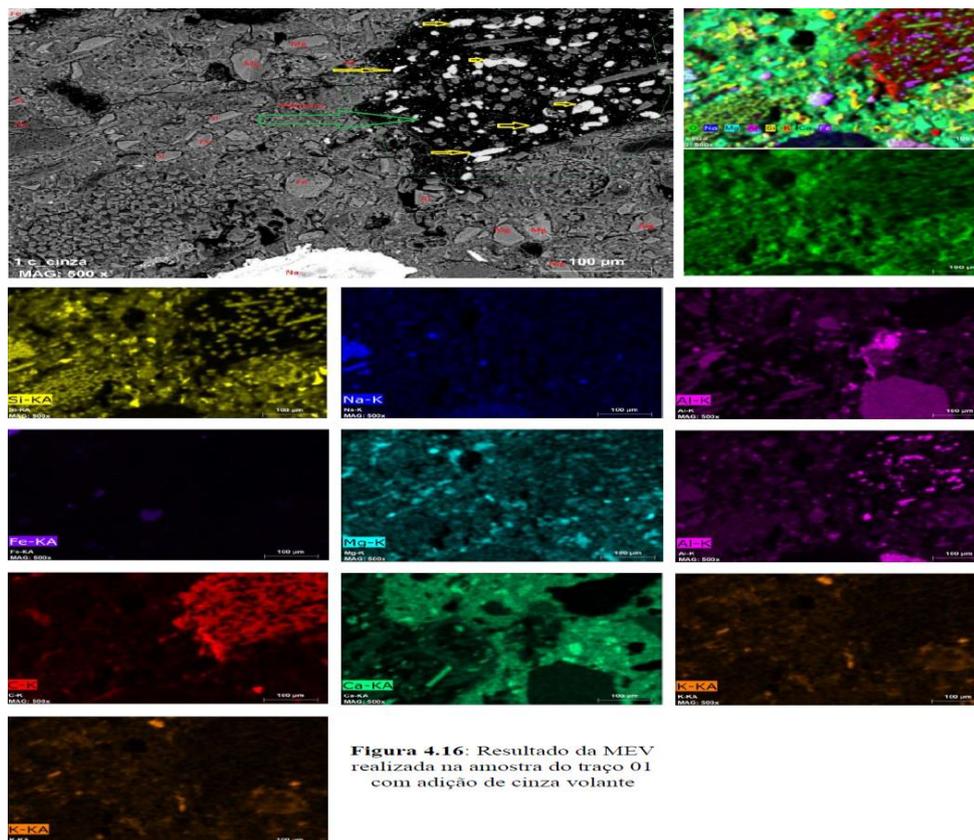


**Figura 4.15:** Resultado da MEV realizada na amostra do traço 1 sem adição de cinza volante

A Figura 4.15 mostra o resultado da MEV para a amostra do traço 1, sem a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. Embora não tenha usado a cinza volante nesse traço, também aparece o elemento Fe. Outro metal identificado no traço 1, que não foi identificado no traço controle, é o Mn (Manganês). O fato desse traço conter esses metais, deve ser devido a resíduo metálico contido na FNM.

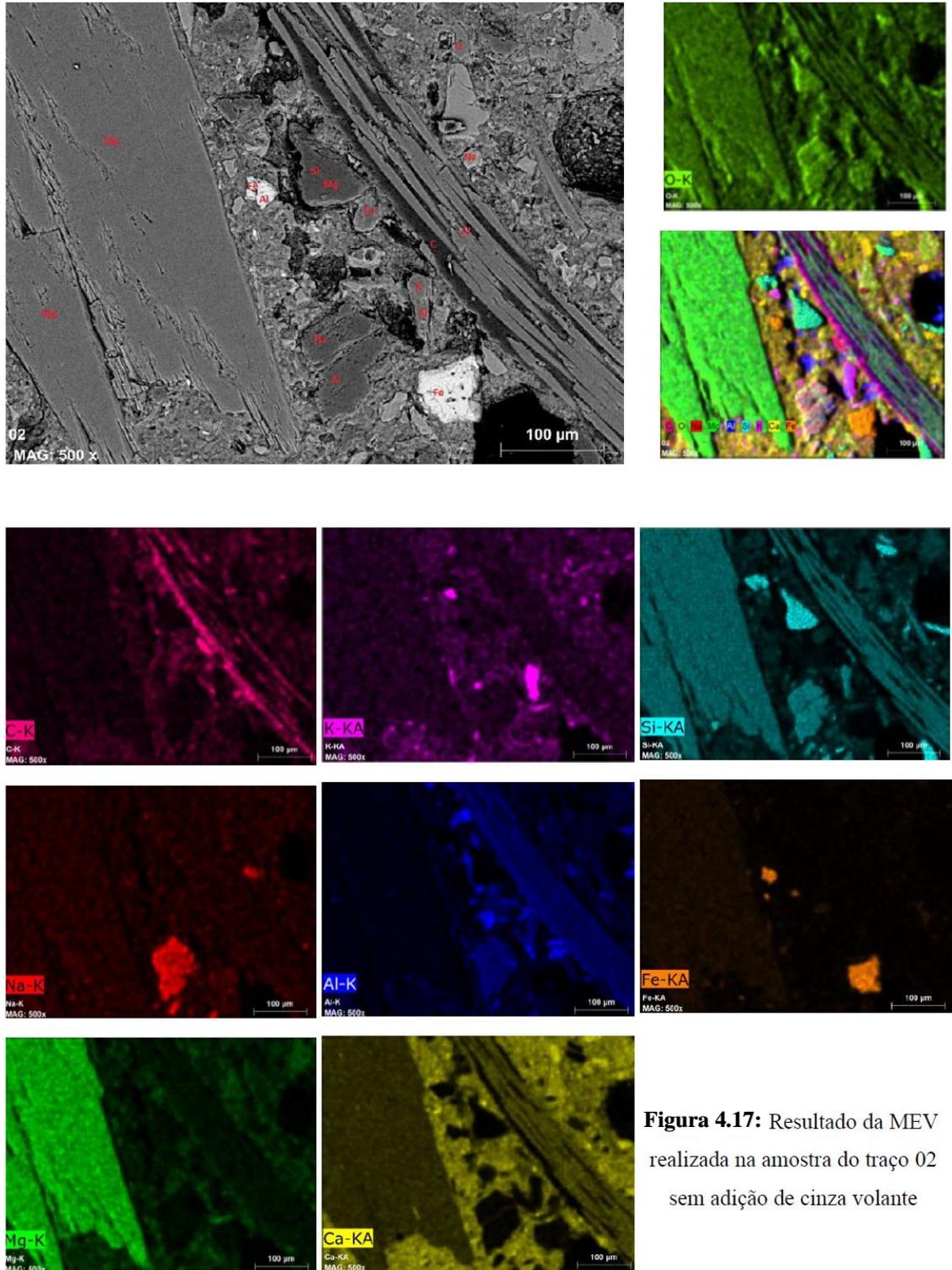
As setas amarelas mostram a área de aderência da massa cimentícia com os componentes (agregados). Essas imagens indicam não haver diferença na aderência da massa cimentícia e os agregados do traço 1, sem a adição de cinza volante, em relação aos traços controles.

A Figura 4.16 mostra o resultado da MEV para a amostra do traço 1, com a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. Como, além da FNM, também foi adicionada a cinza volante, é natural aparecer o elemento Fe, que foi o caso. Os demais componentes são praticamente iguais ao traço controle. A novidade nesse traço foi a identificação de uma quantidade considerável de material polimérico, identificado pela seta verde na imagem maior. Novidade essa que é natural, uma vez na FNM em esse tipo de material é predominante. As áreas de aderência, indicadas pelas setas amarelas, não diferem das áreas de aderência dos traços controles.



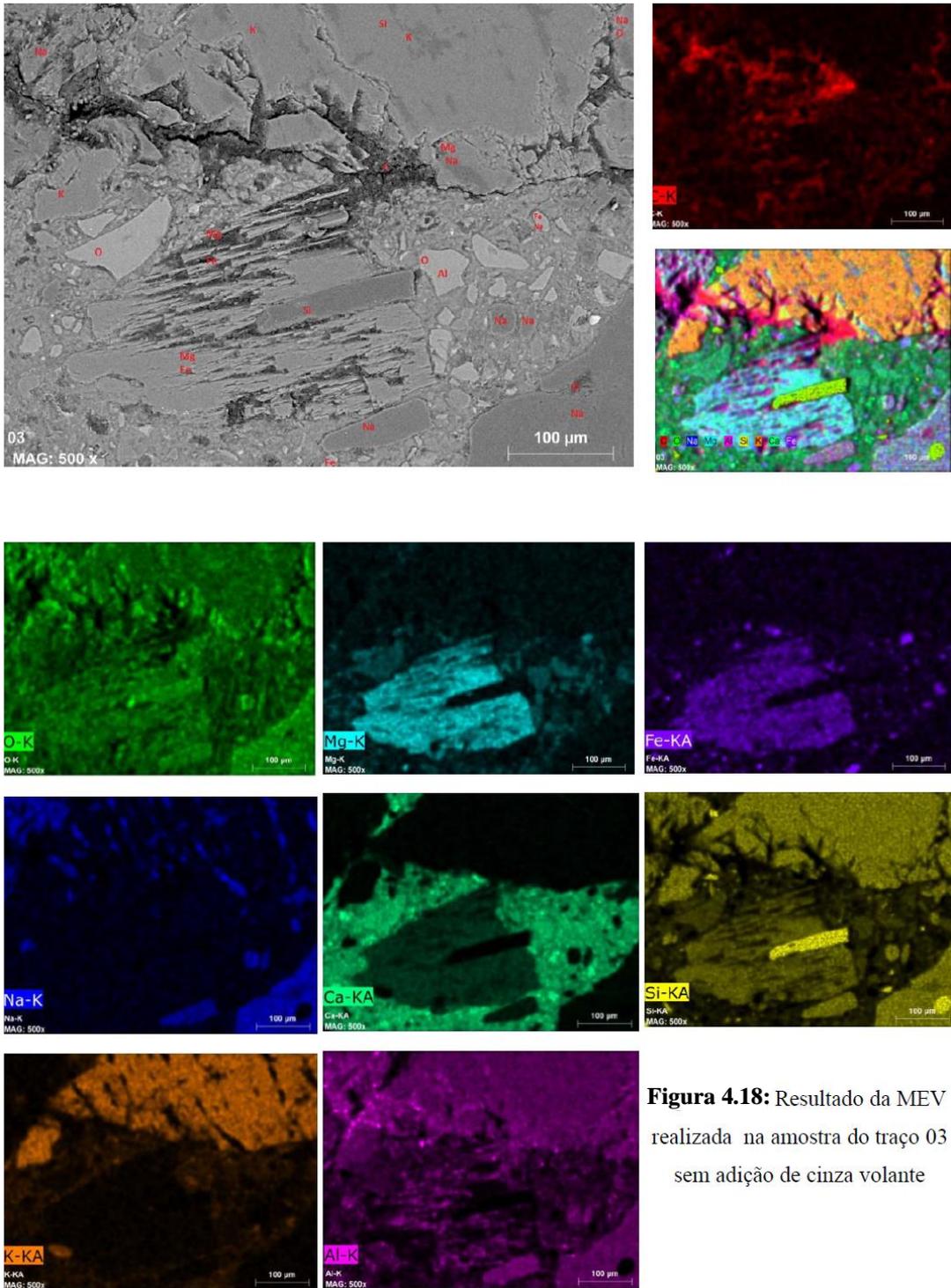
**Figura 4.16:** Resultado da MEV realizada na amostra do traço O1 com adição de cinza volante

A Figura 4.17 mostra o resultado da MEV para a amostra do traço 2, sem a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. Nesse traço também aparece o elemento Fe, que provavelmente tem origem na FNM. Os demais componentes são praticamente iguais ao traço controle.



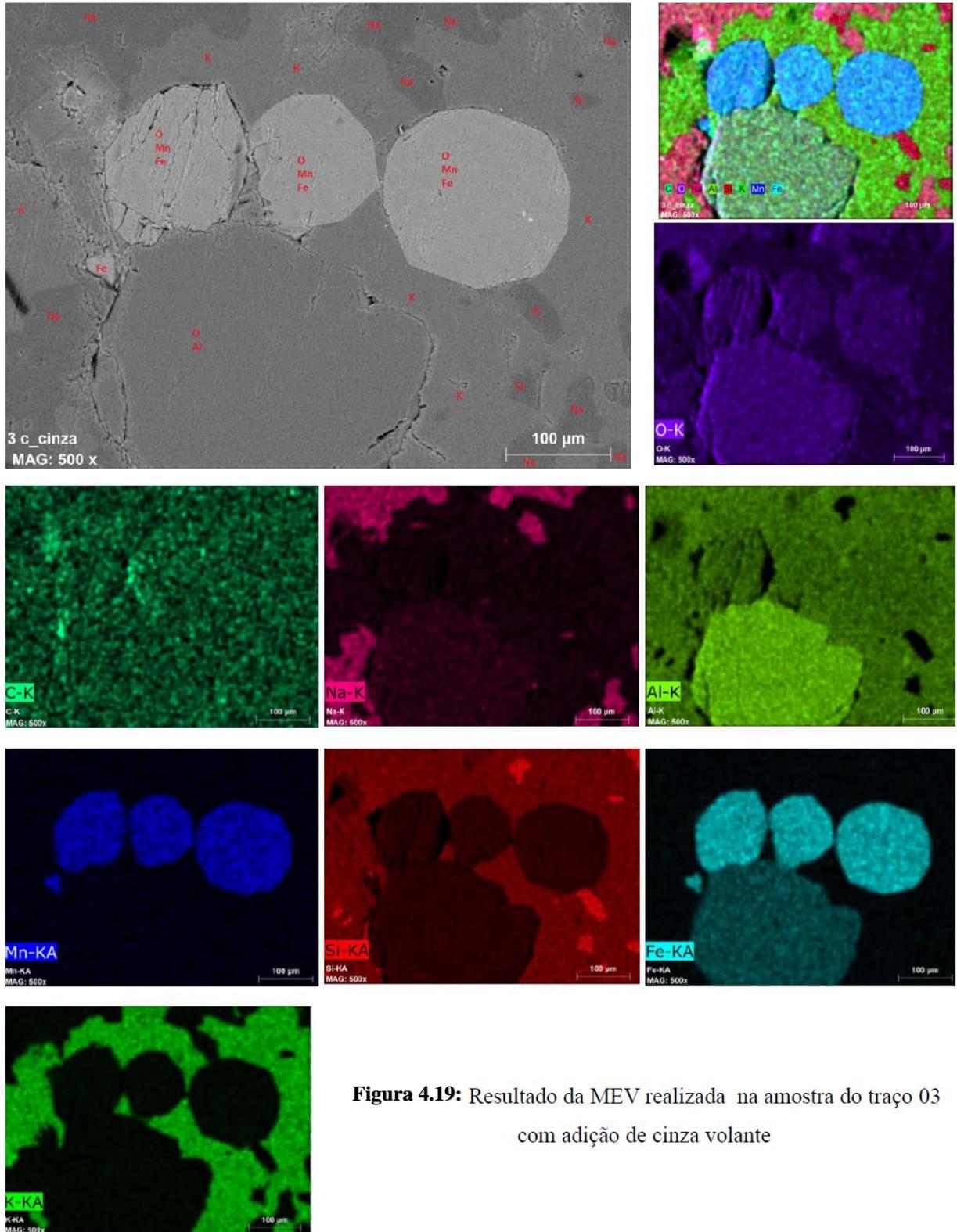
**Figura 4.17:** Resultado da MEV realizada na amostra do traço 02 sem adição de cinza volante

A Figura 4.18 mostra o resultado da MEV para a amostra do traço 3, sem a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. Os dados fornecido por essa figura são semelhantes ao fornecido pela Figura 4.17. Dito de outra forma, os elementos identificados na amostra do traço 2 sem adição de cinza volante, são os mesmos identificados na amostra do traço 3 se adição de cinza volante.



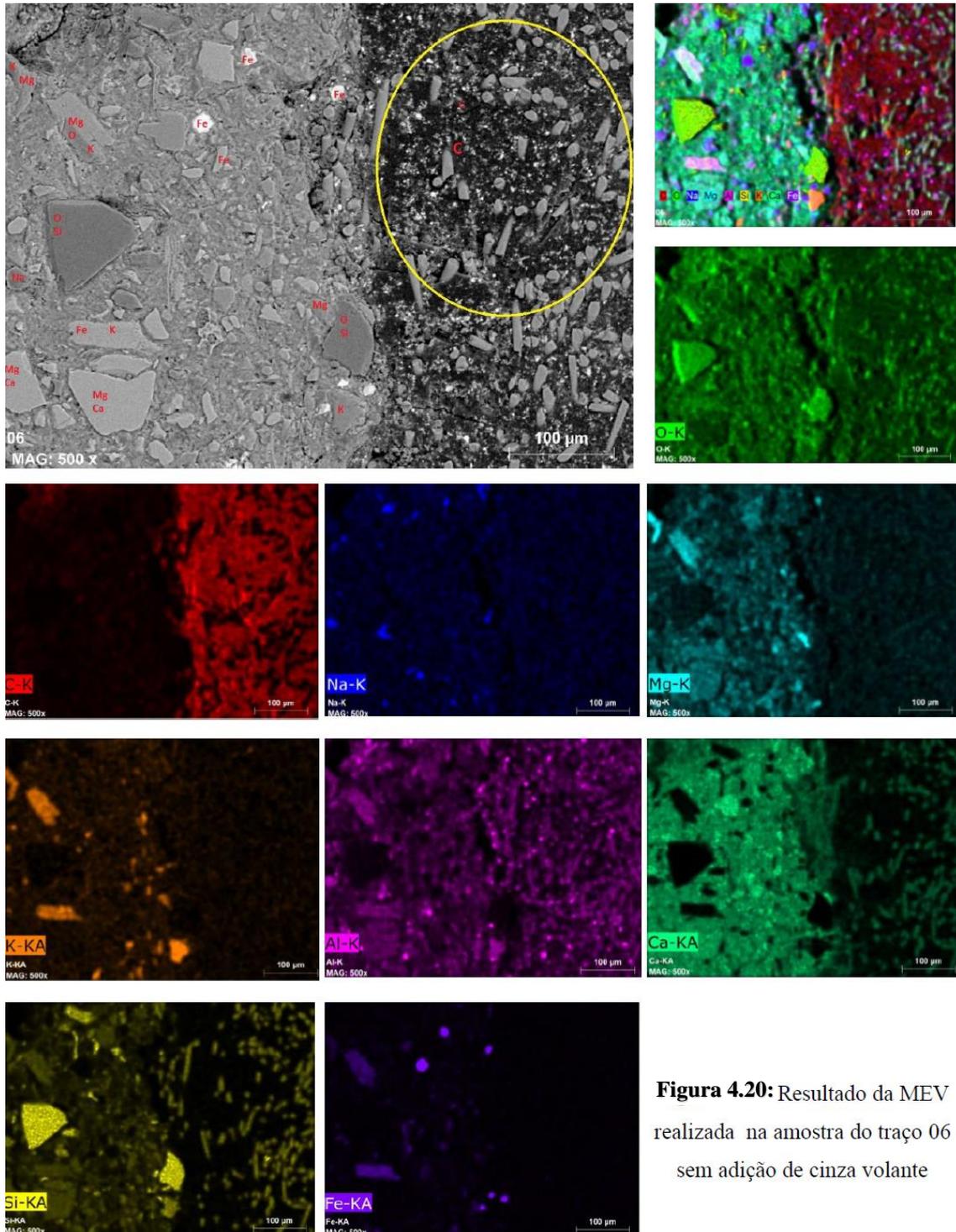
**Figura 4.18:** Resultado da MEV realizada na amostra do traço 03 sem adição de cinza volante

A Figura 4.19 mostra o resultado da MEV para a amostra do traço 3, com a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. Não foi identificado nenhum elemento diferente do traço controle.



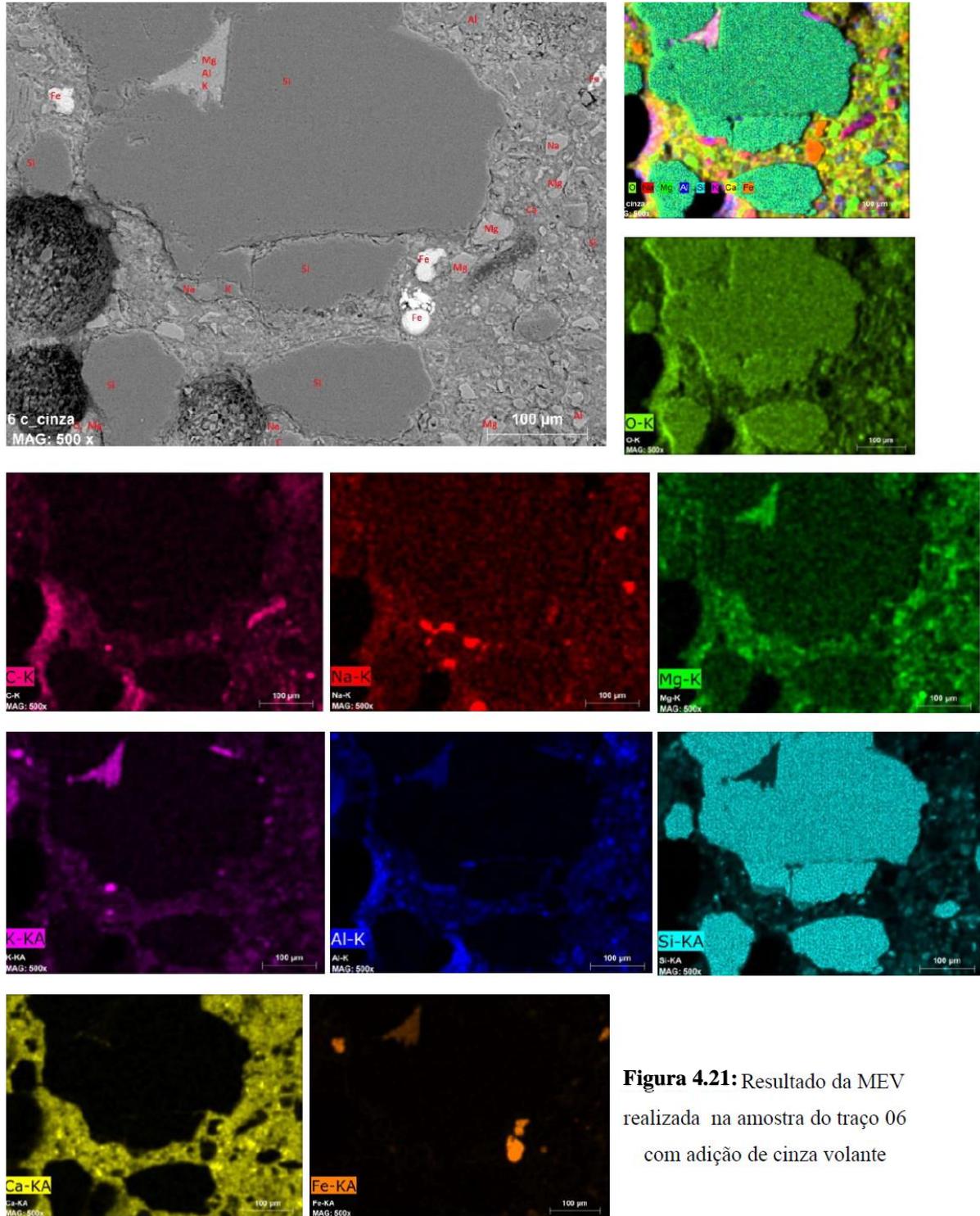
**Figura 4.19:** Resultado da MEV realizada na amostra do traço 03 com adição de cinza volante

A Figura 4.20 mostra o resultado da MEV para a amostra do traço 6, sem a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. Não foi identificado nenhum elemento diferente do traço controle. No entanto foi identificada uma área, que está delimitada em amarelo, que é basicamente de polímero. Isso é natural, uma vez que a maior parte da FNM é composta de polímero.



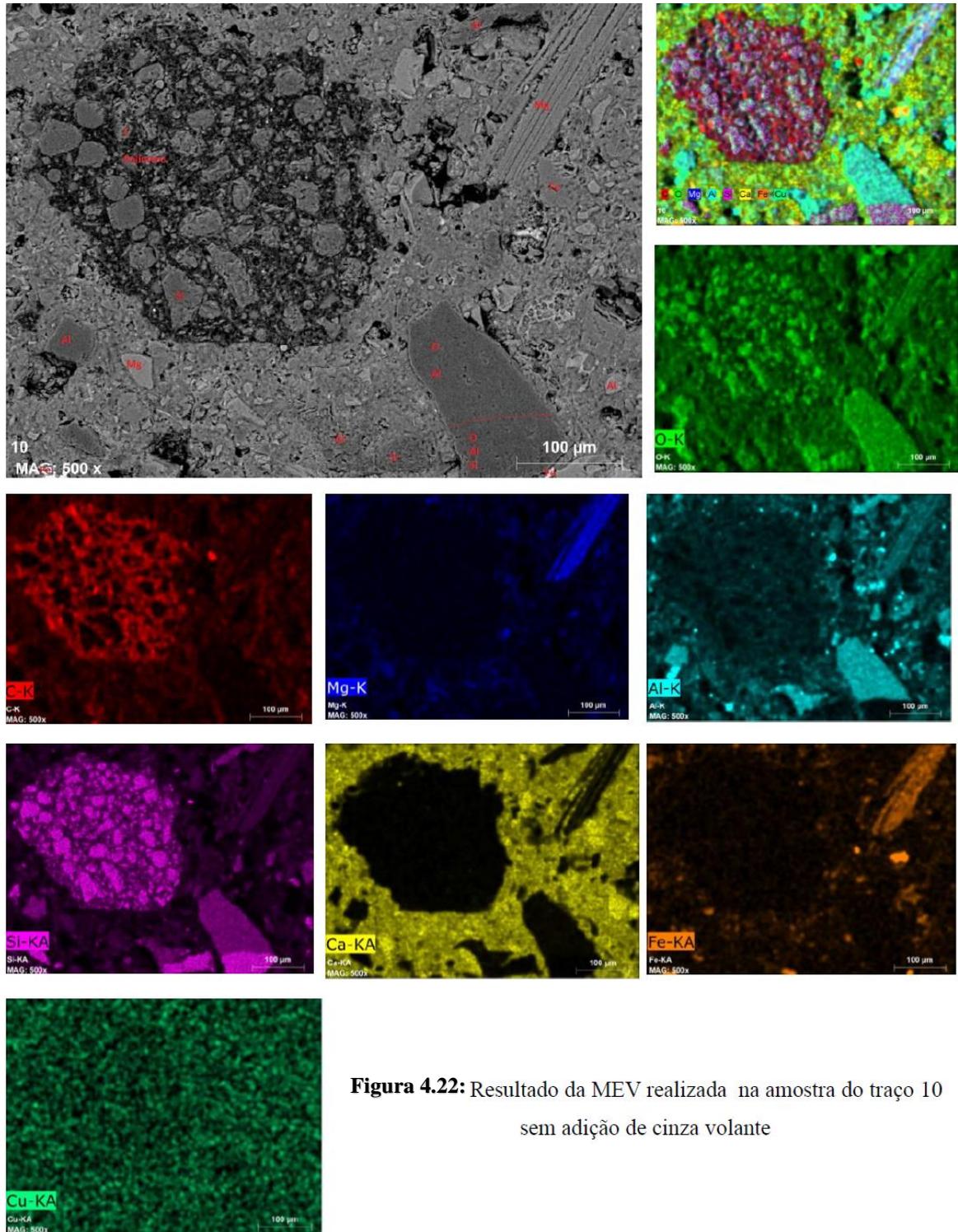
**Figura 4.20:** Resultado da MEV realizada na amostra do traço 06 sem adição de cinza volante

A Figura 4.21 mostra o resultado da MEV para a amostra do traço 6, com a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. Não foi identificado nenhum elemento diferente do traço controle. Também é possível verificar áreas de material polimérico (região cinza escura), provavelmente provenientes da FNM.



**Figura 4.21:** Resultado da MEV realizada na amostra do traço 06 com adição de cinza volante

A Figura 4.22 mostra o resultado da MEV para a amostra do traço 10, sem a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. Não foi identificado nenhum elemento diferente do traço controle. Também é possível verificar áreas de material polimérico (região cinza escura), provavelmente provenientes da FNM.



**Figura 4.22:** Resultado da MEV realizada na amostra do traço 10 sem adição de cinza volante

Com as informações dos resultados da MEV realizada nas amostras dos traços, foi produzido a Tabela 4.5. A Tabela 4.5 sintetiza as informações fornecidas pela MEV. Ao analisar a Tabela 4.5, verifica-se que no traço controle da mistura, que substituiu parte do cimento *Portland* por cinza volante, contem o elemento Fe (Ferro). Esse elemento não aparece no traço controle da mistura sem a adição de cinza volante. Como a cinza volante é, na verdade resíduo de forno siderúrgico, é coerente que o traço controle com a substituição de parte do cimento *Portlando* por cinza volante, contenha o elemento químico Fe. Os demais elementos são os mesmos da mistura sem a adição de cinza volante.

**Tabela 4.5:** Elementos químicos identificados em cada traço

Traço	Elementos identificados
Controle	Al, C, Ca, K, Mg, Na, O, Si
01	Al, C, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, O, Si
02	Al, C, Ca, Fe, K, Mg, Na, O, Si
03	Al, C, Ca, Fe, K, Mg, Na, O, Si
06	Al, C, Ca, Fe, K, Mg, Na, O, Si
10	Al, C, Ca, Cu, Fe, Mg, O, Si
Controle C	Al, C, Ca, Fe, K, Mg, Na, O Si
01 C	Al, C, Ca, K, Mg, Na, O, Si
03 C	Al, C, Fe, K, Mn, Na, O, Si
06 C	Al, C, Ca, Fe, K, Mg, Na, O, Si

Na Tabela 4.5 os traços 01, 02, 03, 06 e 10 são os traços onde houve substituição de parte dos agregados naturais por FNM e não houve a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. Nesses traços, além dos elementos que apareceram no traço controle sem a substituição de parte do cimento, aparece o elemento Fe. O fato desses traços obterem esse elemento deve ser devido a resíduos de material metálico contido na FNM. Outro elemento diferente dos elementos do traço controle, que aparece somente no traço 01, é o Mn (Manganês). Isso, provavelmente, deve ser resíduo de metal contido na FNM. Este presente trabalho avalia que esses resultados são uma evidência de que não há alteração significativa na composição química dos traços com a substituição de parte dos agregados pela FNM com o traço sem essa substituição.

Análise da MEV (Figuras 4.13 até 4.22) nos traços analisados neste trabalho, mostra haver muito pouco resíduo metálico O restante dos componentes identificados são os componentes usuais do concreto, como areia e massa cimentícia, e materiais não metálicos, predominantemente polímeros. Essas informações corroboram para que este trabalho infira que

não há diferenças significativas na composição dos traços que utilizaram a FNM. Essas figuras mostram que a proporção de Fe encontrada nos traços não são diferente do que a proporção do Fe encontrada no traço controle com a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante. Como a cinza volante é o substituo cimentício mais utilizado no mundo, é natural que este presente trabalho conclua que essa proporção não é prejudicial para as características do concreto. As mesmas inferências podem ser feitas em relação aos traços controle, 01, 03 e 06 com cinzas.

Através do MEV é possível visualizar a área de aderência da massa cimentícia com os componentes. Algumas áreas foram marcadas na Figura com uma seta amarela. É possível ver que não há diferença significagiva no nível de aderência entre os componentes usuais do concreto e componentes da FNM.

A Tabela 4.5 mostra resultados muito positivos para todos os traços analisados neste trabalho. Além de msotrar que não há modificação significativa nas características do concreto com as substituições investigadas aqui, mostra que entre os elementos químicos identificados pela MEV, não foi detectado nenhum elemento tóxico, como mercúrio, cadimo ou chumbo.

A Tabela 4.6 mostra o resultado dos ensaios para medir o nível de pH na água coletada nos recipientes onde as amostras ficaram imersas no períodos de 24, 72, 168 e 384 horas.

Tabela 4.6: Resultado do nível de pH nas águas coletadas das amostras

Traço	Resultados por período de tempo em horas			
	24	72	168	384
Controle	10,8	10,20	9,28	7,25
01	9,9	9,00	8,49	7,73
02	10,73	10,55	9,19	8,57
03	10,48	10,83	10,3	9,77
06	10,29	9,70	8,73	7,56
10	10,28	9,01	7,97	8,8
Controle C	10,31	10,14	9,40	9,25
01 C	10,02	8,87	8,8	8,81
03 C	11,13	10,12	9,96	9,33
06 C	10,50	9,40	9,35	9,13

Uma substância é denominada alcalina, quando os seu pH é superior a 7,00 (MIKAMI, 2017). Analisando os resultados mostrados na Tabela 4.6, é possível verificar que para todos os períodos, percebe-se que o lixiviado do concreto apresentou caraterísticas alcalina para todos os traços. Essa alcalinidade do lixiviado do concreto é coerente com o caracerística alcalina da

pasta de cimento, que tem origem principalmente nos íons de hiroxila, juntamente com a contribuição de outros íons como  $Fe^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^{+}$  e  $K^{+}$  (MIKAMI, 2017).

Apesar de apresentar uma característica alcalina, o lixiviado dos traços contendo a FNM apresentaram pH bem próximos do pH do traço controle. Mesmo para os traços contendo cinza volante os valores do pH do lixiviado ficaram próximo do pH do controle. Outra informação relevante fornecida pela Tabela 4.6 é que, com o passar do tempo, o pH diminui para todos dos traços. Novamente percebe-se que o pH do lixiviado dos traços experimentais é próximo do pH dos traços controles.

A Tabela 4.7 mostra os resultados do teste de condutividade elétrica para o lixiviado dos traços de concreto do experimento.

Tabela 4.7: Resultado do teste de condutividade elétrica nas águas coletadas das amostras

Traço	Resultados, em $\mu S/cm$ , por período de tempo em horas			
	24	72	168	384
Controle	221,4	192,2	149,1	143,3
01	246,8	215,9	183,1	161,6
02	359,7	289,6	180,9	146,9
03	274,3	343,9	207,4	146,0
06	235,6	219,0	156,2	146,9
10	272,1	222,7	177,4	153,7
Controle C	190,4	213,4	159,4	143,1
01 C	369,8	246,3	200,7	163,2
03 C	626,4	376,6	297,1	247,1
06 C	317,5	212,2	173,5	157,9

Ao analisar os dados da Tabela 4.7 verifica-se que a condutividade elétrica dos traços do experimento, sem a adição de cinza volante, é bem próxima do valor da condutividade do traço controle. Isso indica que a adição da FNM no concreto não altera, significativamente, a condutividade do lixiviado dos traços com essa adição. Isso é um forte indício de que a adição da FNM no concreto contribui positivamente para o meio ambiente.

Já em relação aos traços contendo cinza volante, os dados da Tabela 4.7 indicam um valor maior de condutividade elétrica. O traço 3 com cinza, por exemplo, teve um valor de condutividade elétrica três vezes maior do que o traço controle com cinza. Essa informação indica não ser muito positivo a combinação de adição da FNM e de cinza volante na produção do concreto.

## CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

As preocupações em relação ao meio ambiente são crescentes em todo mundo. Em consequência dessas preocupações, o DS passou a ser uma questão muito importante para a maioria das indústrias, principalmente as indústrias que utilizam muito recurso natural como matéria-prima. Entre essas indústrias, este presente trabalho destaca as indústria da construção civil e a de EEE.

Além da utilização de recursos naturais pelas indústrias, a destinação adequada dos resíntos é um dos caminhos para um DS. Este presente trabalho identificou que há uma grande preocupação com a destinação do *e-waste*. Os motivos são que esse tipo de resíduo é o que tem a maior taxa de geração em todo mundo, além de ser um resíduo que é composto de vários componentes tóxicos.

Este presente trabalho identificou que um tipo de *e-waste* que encontra muita dificuldade para sua destinação é a FNM. Essas dificuldades são causadas por não despertarem interesse das indústria de reciclagem, uma vez que essas tem como foco principal a recuperação de metais preciosos.

As preocupações com a indústria da construção civil vão além da utilização de recursos naturais e pela destinação de seus resíduos. Uma das maiores preocupações é com o processo de fabricação do cimento *Portland*, que é o material mais usado pela indústria da construção civil. Tal processo é o responsável pela maior quantidade de emissão do  $CO_2$ , que é o um grande causador do efeito estufa.

Diante dessas questões levantadas, este presente trabalho avalia ter contribuído no desenvolvimento de um concreto verde que seja classificado como concreto estrutural. Esta contribuição foi feita ao analisar a substituição de dois tipos de resíduos como parte da matéria prima na produção do concreto. A primeira contribuição para o desenvolvimento do concreto verde são os experimentos que avaliaram a substituição de parte dos agregados naturais pela FNM. A segunda foram os experimentos que investigaram a substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante.

As análises estatísticas mostraram ser viável a substituição de partes dos agregados naturais pela FNMs. Traços de concreto, utilizando essa substituição, produziram corpos de prova que obtiveram uma resistência acima de 20 MPa. Essa resistência classifica esse concreto como estrutural. Esses resultados aconteceram tanto para o concreto produzido com 20% de substituição de cimento *Portlando* por cinza volante, como para concreto produzido sem essa substituição. Outro resultado importante obtido por este presente trabalho é que não houve

diferença, estatisticamente significativa, na resistência à compressão do concreto utilizando a substituição de 20% do cimento *Portland* por cinza volante, com a resistência do concreto sem essa substituição.

Como um dos principais objetivos deste presente trabalho é destinar corretamente a FNM, este presente trabalho realizou ensaios de lixiviação. Os resultados mostraram que nos corpos de prova, contendo os resíduos, não foram encontrados elementos químicos diferentes dos encontrados nos corpos de prova de controles. O resultado mais importante dos ensaios de lixiviação foi a não detecção de elementos químicos tóxicos, como chumbo e mercúrio. Isso indica que a utilização dos resíduos como matéria prima na produção de concreto não contribui para degradar o meio ambiente.

Assim, este presente trabalho conclui que uma forma de mitigar as dificuldades em destinar corretamente a FNM e o efeito estufa, causado pela emissão de  $CO_2$  pelo processo de fabricação do cimento *Portland*, é substituir parte dos agregados naturais pela FNM e substituir em 20% o cimento *Portland* por cinza volante. Dito de outra forma, a principal conclusão deste presente trabalho é de que, do ponto de vista da proteção ambiental e economia de recursos naturais, as informações obtidas neste experimento indicam que a substituição de parte dos agregados naturais pela fração não metálica das placas de circuito impresso e a substituição de 20% do cimento *Portland* pela cinza volante são razoáveis e significativas.

Este trabalho entende que a substituição de parte dos agregados naturais na produção do concreto pela FNMs é um fato inovador desta presente pesquisa. Também entende que é inovador a indicação de que a combinação da substituição de parte do cimento *Portland* por cinza volante com a substituição de partes dos agregados naturais pela FNMs é, igualmente, um fato inovador.

Como trabalhos futuros, este presente trabalho pretende investigar a substituição de parte dos agregados naturais pela fração não metálica de PCI, com percentuais de substituição maiores do que as investigadas aqui. O motivo é que a análise estatística indicou que uma maior porcentagem dessa substituição pode melhorar as resistências obtidas neste presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Nbr 5739 :2007 Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 14, 2007.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 8953 Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**, 2015.
- ADEWUNMI, Y.; OMIRIN, M.; KOLEOSO, H. Developing a sustainable approach to corporate FM in Nigeria. **Facilities**, v. 30, n. 9/10, p. 350–373, 29 jun. 2012.
- ADEYEYE, K.; SHE, K.; BAÏRI, A. Design factors and functionality matching in sustainability products: A study of eco-showerheads. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 4214–4229, 2017.
- AFONSO, M. *et al.* Building Blocks Production with Sludge. **Applied Mechanics and Materials**, v. 368–370, n. 1, p. 860–863, ago. 2013.
- ALMEIDA, C. M. V. B. *et al.* Emergy as a tool for Ecodesign: evaluating materials selection for beverage packages in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 1, p. 32–43, jan. 2010.
- ALMEIDA, F. C. R. *et al.* Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 31–38, maio 2015.
- ALRABGHI, A.; TIWARI, A. State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 82, p. 167–182, abr. 2015.
- AMORIM JÚNIOR, N. S.; SILVA, G. A. O.; RIBEIRO, D. V. Effects of the incorporation of recycled aggregate in the durability of the concrete submitted to freeze-thaw cycles. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 723–730, fev. 2018.
- AMRAN, M.; DEBBARMA, S.; OZBAKKALOGLU, T. Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121857, fev. 2021.
- ANJOS, M. A. G. DOS; SALES, A. T. C.; ANDRADE, N. Blasted copper slag as fine aggregate in Portland cement concrete. **Journal of Environmental Management**, v. 196, p. 607–613, jul. 2017.
- AREZOUMANDI, M.; VOLZ, J. S. Effect of fly ash replacement level on the shear strength

of high-volume fly ash concrete beams. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 120–130, nov. 2013.

ASKHAM, C.; GADE, A. L.; HANSSEN, O. J. Combining REACH, environmental and economic performance indicators for strategic sustainable product development. **Journal of Cleaner Production**, v. 35, p. 71–78, nov. 2012.

ASTM. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime. **ASTM International**, v. i, p. 1–37, 2011.

AZEVEDO, L. P. *et al.* E-waste management and sustainability: a case study in Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 32, p. 25221–25232, 19 nov. 2017.

BACARJI, E.; MARQUES, V. C.; TOLEDO FILHO, R. D. Self-Compacting and Conventional Concrete with Mineral Waste: Fresh and Hardened State Properties. **Key Engineering Materials**, v. 517, p. 547–555, jun. 2012.

BAHRANIFARD, Z.; FARSHCHI TABRIZI, F.; VOSOUGHI, A. R. An investigation on the effect of styrene-butyl acrylate copolymer latex to improve the properties of polymer modified concrete. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 175–185, abr. 2019.

BAILEY, J. Looking for Sustainable solutions in salmon aquaculture. **Etikk i Praksis**, v. 8, n. 1, p. 22–40, 2014.

BHASKAR, K.; TURAGA, R. M. R. India ' s E-Waste Rules and Their Impact on E-Waste Management Practices A case Study. **Journal of Industrial Ecology**, v. 22, n. 4, 2017.

BOND, A. J. *et al.* Informal knowledge processes: the underpinning for sustainability outcomes in EIA? **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 1, p. 6–13, jan. 2010.

BORGES MARINHO, A. L. *et al.* Ladle Furnace Slag as Binder for Cement-Based Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 11, p. 04017207, nov. 2017.

BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 376–385, 2017.

BYGGETH, S.; HOCHSCHORNER, E. Handling trade-offs in Ecodesign tools for

sustainable product development and procurement. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 15–16, p. 1420–1430, jan. 2006.

CAETANO, J. A.; SCHALCH, V.; PABLOS, J. M. Characterization and recycling of the fine fraction of automotive shredder residue (ASR) for concrete paving blocks production. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 22, n. 4, p. 835–847, 27 maio 2020.

CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; ANGELIS NETO, G. DE. A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 29, n. 2, p. 141–149, 12 fev. 2008.

CARVALHO, S. Z. *et al.* The recycling effect of BOF slag in the portland cement properties. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, n. August, p. 216–220, dez. 2017.

CASTRO MENDES, J. *et al.* Coating mortars based on mining and industrial residues. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 5, p. 1569–1586, 16 set. 2020.

CAYUMIL, R. *et al.* Generation of copper rich metallic phases from waste printed circuit boards. **Waste Management**, v. 34, n. 10, p. 1783–1792, out. 2014.

CHANG, D.; LEE, C. K. M.; CHEN, C. H. Review of life cycle assessment towards sustainable product development. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 48–60, 2014.

CHEN, D. *et al.* Pollution characterization and diurnal variation of PBDEs in the atmosphere of an E-waste dismantling region. **Environmental Pollution**, v. 157, n. 3, p. 1051–1057, mar. 2009.

CHEN, E. *et al.* Environmentally Responsible Happy Nation Index: Refinements and 2015 Rankings. **Social Indicators Research**, v. 134, n. 1, p. 39–56, 2017.

CHEN, M. *et al.* China E-waste management: Struggling for future success. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 139, n. June, p. 48–49, dez. 2018.

CHEN, Y. *et al.* Impact of technological innovation and regulation development on e-waste toxicity: a case study of waste mobile phones. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 7100, 8 dez. 2018.

COELHO, M. S.; RESENDE, F. M.; FERNANDES, G. W. Chinese Economic Growth: Implications for Brazilian Conservation Policies. **Natureza & Conservação**, v. 11, n. 1, p.

88–91, 2013.

COETZER, R.; HAINES, L. M. The construction of D- and I-optimal designs for mixture experiments with linear constraints on the components. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 171, p. 112–124, dez. 2017.

COIMBRA, M. A.; LIBARDI, W.; MORELLI, M. R. Utilização de rejeitos de pilha zinco-carvão em argamassas e concretos de cimento Portland. **Cerâmica**, v. 50, n. 316, p. 300–307, dez. 2004.

COPETTI, C. M. *et al.* Evaluation of tire rubber surface pre-treatment and silica fume on physical-mechanical behavior and microstructural properties of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120670, maio 2020.

COPPIO, G. J. L. *et al.* Surface electrical resistivity and compressive strength of concrete with the use of waste foundry sand as aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 514–521, jul. 2019.

CORNELL, J. A. Experiments with Mixtures: A review. **Taylor & Francis, Ltd. on behalf of American Statistical Association and American Society for Quality**, v. 15, n. 3, p. 437–455, 1973.

\_\_\_\_\_. Experiments with mixture-designs, models and the analysis of mixture data. **Wiley**, p. 631, 1990.

CUCCHIELLA, F. *et al.* Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 263–272, nov. 2015.

\_\_\_\_\_. Automotive printed circuit boards recycling: An economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 130–141, 2016.

DAMAL, V. S.; LONDHE, S. S.; MANE, A. B. Utilization of Electronic Waste Plastic in Concrete. v. 5, n. 4, p. 35–38, 2015.

DANGELICO, R. M.; PONTRANDOLFO, P.; PUJARI, D. Developing Sustainable New Products in the Textile and Upholstered Furniture Industries : Role of External Integrative Capabilities \*. **Journal of Product Innovation Management**, v. 30, n. 4, p. 642–658, 2013.

DELAHUNT, J. Sustainability. **Chemical Health and Safety**, v. 12, n. 2, p. 33, mar. 2005.

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

DEMAJOROVIC, J.; MIGLIANO, J. E. B. POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUAS IMPLICAÇÕES NA CADEIA DA LOGÍSTICA REVERSA DE MICROCOMPUTADORES NO BRASIL. **Gestão e Regionalidade**, v. 29, n. 87, p. 64–80, 2013.

DING, J.-T. *et al.* Extreme vertices design of concrete with combined mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 6, p. 957–960, jun. 1999.

DRAPER, N. R. Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments. **Journal of Statistical Planning and Inference**, v. 59, n. 1, p. 185–186, mar. 1997.

DURANTE INGUNZA, M. DEL P.; CAMARINI, G.; MURILO SILVA DA COSTA, F. Performance of mortars with the addition of septic tank sludge ash. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 308–315, jan. 2018.

EUROPEU, P. DIRECTIVA 2002/96/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 27 de Janeiro de 2003 relativa aos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE). v. 5, p. 24–38, 2003.

FARGNOLI, M.; MINICIS, M. DE; TRONCI, M. Design Management for Sustainability: An integrated approach for the development of sustainable products. **Journal of Engineering and Technology Management - JET-M**, v. 34, p. 29–45, 2014.

FAVARETTO, P. *et al.* Characterization and Use of Construction and Demolition Waste from South of Brazil in the Production of Foamed Concrete Blocks. **Applied Sciences**, v. 7, n. 10, p. 1090, 21 out. 2017.

FEAM. **Diagnóstico da Geração de Resíduos Eletroeletrônicos no Estado de Minas Gerais-Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM)**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www2.mma.gov.br/port/conama/processos/4E1B1104/DiagGer\\_REE\\_MG\\_FEAM\\_EMPA.pdf](http://www2.mma.gov.br/port/conama/processos/4E1B1104/DiagGer_REE_MG_FEAM_EMPA.pdf)>. Acesso em: 29 nov. 2018.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduos do processo de recauchutagem de pneus. **Acta Scientiarum**.

**Technology**, v. 32, n. 3, p. 237–244, 9 nov. 2010.

FRANCO, R. G. F.; LANGE, L. C. Estimativa do fluxo dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos no município de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 73–82, mar. 2011.

FU, J. *et al.* High levels of heavy metals in rice (*Oryza sativa* L.) from a typical E-waste recycling area in southeast China and its potential risk to human health. **Chemosphere**, v. 71, n. 7, p. 1269–1275, abr. 2008.

GARCIA, G. D. M.; BARRETO, M. R.; CRISPIM, F. A. Substituição de agregados minerais por resíduos de concreto na fabricação de pavimento asfáltico. **Sustentabilidade em Debate**, v. 9, n. 3, p. 185–197, 28 dez. 2018.

GESOĞLU, M. *et al.* Recycling ground granulated blast furnace slag as cold bonded artificial aggregate partially used in self-compacting concrete. **Journal of Hazardous Materials**, v. 235–236, p. 352–358, out. 2012.

GO, T. F.; WAHAB, D. A.; HISHAMUDDIN, H. **Multiple generation life-cycles for product sustainability: The way forward** **Journal of Cleaner Production**, maio 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615001870>>

GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; NAREDO, J. M. In search of lost time: the rise and fall of limits to growth in international sustainability policy. **Sustainability Science**, v. 10, n. 3, p. 385–395, 22 jul. 2015.

GÓMEZ, M. *et al.* Stabilization of hazardous compounds from WEEE plastic: Development of a novel core-shell recycled plastic aggregate for use in building materials. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 116977, jan. 2020.

GRANZOTTO, L.; SOUZA, R. A. DE. Mechanical properties of structural concrete with partial replacement of fine aggregate by tire rubber. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 35, n. 1, p. 39–44, 30 jan. 2013.

GRILLO, R. H. F. **Estudo da Influência de Aditivos Redutores de Água em Concreto da Construção Civil**. [s.l.] Universidade Federal de Alfenas, 2014.

HACKENHAAR, I. C. *et al.* Life Cycle Assessment applied to construction and demolition waste treatment: proposal of a Brazilian scenario. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 323, n. 1, p. 012054, 6 set. 2019.

- HANDWERKER, C. *et al.* Integrated Sustainable Life Cycle Design: A Review. **Journal of Mechanical Design**, v. 132, n. 9, p. 091004, 2010.
- HARIEMBRUNDTLAND, G. World Commission on environment and development. **Environmental Policy and Law**, v. 14, n. 1, p. 26–30, mar. 1985.
- HELD, M. *et al.* Current challenges for sustainable product development in the German automotive sector : A survey based status assessment. **Journal of Cleaner Production journal**, v. 195, 2018.
- HUANG, C. *et al.* Level changes and human dietary exposure assessment of halogenated flame retardant levels in free-range chicken eggs : A case study of a former e-waste recycling site , South China. **Science of the Total Environment**, v. 634, p. 509–515, 2018.
- IKHLAYEL, M. An integrated approach to establish e-waste management systems for developing countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 119–130, 2018.
- JEON, S. *et al.* Gold recovery from shredder light fraction of E-waste recycling plant by flotation-ammonium thiosulfate leaching. **Waste Management**, v. 77, p. 195–202, 2018.
- JIANG, B. *et al.* Impacts of heavy metals and soil properties at a Nigerian e-waste site on soil microbial community. **Journal of Hazardous Materials**, v. 362, n. August 2018, p. 187–195, jan. 2019.
- JIANG, L. *et al.* Biphenyl-Metabolizing Microbial Community and a Functional Operon Revealed in E-Waste-Contaminated Soil. **Environmental Science & Technology**, v. 52, p. 8558–8567, 2018.
- KAHHAT, R. *et al.* Exploring e-waste management systems in the United States. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 7, p. 955–964, maio 2008.
- KANTARCI, F.; TÜRKMEN, İ.; EKINCI, E. Improving elevated temperature performance of geopolymer concrete utilizing nano-silica, micro-silica and styrene-butadiene latex. **Construction and Building Materials**, v. 286, 2021.
- KAYA, M. Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. **Waste Management**, v. 57, p. 64–90, nov. 2016.
- KEUNG WONG, D. F.; LI, C. Y.; SONG, H. X. Rural migrant workers in urban China: living a marginalised life. **International Journal of Social Welfare**, v. 16, n. 1, p. 32–40,

jan. 2007.

KHETRIWAL, D. S.; KRAEUCHI, P.; WIDMER, R. Producer responsibility for e-waste management: Key issues for consideration – Learning from the Swiss experience. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 1, p. 153–165, jan. 2009.

KHURI, A. I.; MUKHOPADHYAY, S. Response surface methodology. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 2, n. 2, p. 128–149, 19 mar. 2010.

KIDDEE, P.; NAIDU, R.; WONG, M. H. Electronic waste management approaches: An overview. **Waste Management**, v. 33, n. 5, p. 1237–1250, maio 2013.

KISSINGER, M.; REES, W. E.; TIMMER, V. Interregional sustainability: governance and policy in an ecologically interdependent world. **Environmental Science & Policy**, v. 14, n. 8, p. 965–976, dez. 2011.

KUMAR, A.; HOLUSZKO, M.; ESPINOSA, D. C. R. E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 32–42, 2017a.

\_\_\_\_\_. E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 32–42, jul. 2017b.

KUMAR, U.; GAIKWAD, V.; SAHAJWALLA, V. Transformation of waste toner to iron using E-waste plastics as a carbon resource. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 244–251, 2018.

LACASA, E.; SANTOLAYA, J. L.; BIEDERMANN, A. Obtaining sustainable production from the product design analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 706–716, 2016.

LEMA, W.; CASTILLO, E. Relaciones agua/cemento en diseño de vértices extremos aplicado a mortero. **MASKANA**, v. 9, n. 1, p. 125–140, 28 jun. 2018.

LEUNG, A. O. W. *et al.* Heavy metals concentrations of surface dust from e-waste recycling and its human health implications in southeast China. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 7, p. 2674–2680, 2008.

LI, H. *et al.* Brominated and organophosphate flame retardants along a sediment transect encompassing the Guiyu, China e-waste recycling zone. **Science of The Total Environment**, v. 646, p. 58–67, jan. 2019.

- LI, J. *et al.* Regional or global WEEE recycling. Where to go? **Waste Management**, v. 33, n. 4, p. 923–934, abr. 2013.
- LI, J.; ZENG, X.; STEVELS, A. Ecodesign in Consumer Electronics: Past, Present, and Future. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 8, p. 840–860, 18 abr. 2015.
- LI, Z. *et al.* Prediction of the autogenous shrinkage and microcracking of alkali-activated slag and fly ash concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 117, n. December 2020, p. 103913, mar. 2021.
- LIEW, K. M.; SOJOBI, A. O.; ZHANG, L. W. Green concrete: Prospects and challenges. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 1063–1095, dez. 2017.
- LIMA, A. J. M. DE; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos da madeira de *Pinus* spp. como substituição ao agregado miúdo na produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 223–235, 30 mar. 2014.
- LIU, H. *et al.* **Investigation on Collection Mode of Domestic E-waste in Urban China: the Case of Beijing** Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. **Anais...IEEE**, maio 2007 Disponível em:  
<<http://ieeexplore.ieee.org/document/4222893/>>
- LIU, H. *et al.* E-waste recycling induced polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzo-furans pollution in the ambient environment. **Environment International**, v. 34, n. 1, p. 67–72, jan. 2008.
- LIU, Y. *et al.* Halogenated organic pollutants in aquatic , amphibious , and terrestrial organisms from an e-waste site : Habitat-dependent accumulation and maternal transfer in watersnake \*. **Environmental Pollution**, v. 241, p. 1063–1070, 2018.
- LO, T. Y.; CUI, H. Z.; LI, Z. G. Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete. **Waste Management**, v. 24, n. 4, p. 333–338, 2004.
- LU, B. *et al.* The environmental impact of technology innovation on WEEE management by Multi-Life Cycle Assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 89, p. 148–158, 2015.
- LUHAR, S.; LUHAR, I. **Potential application of E-wastes in construction industry: A review** **Construction and Building Materials**, abr. 2019. Disponível em:  
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819300960>>

LUIS DE OLIVEIRA JÚNIOR, A. *et al.* The influence of partial replacement of natural sand aggregates by grits residues on the mechanical properties of an ecological mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 26, n. August, p. 100912, 2019.

LUO, C. *et al.* Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, south China. **Journal of Hazardous Materials**, v. 186, n. 1, p. 481–490, fev. 2011.

LUO, X. *et al.* Persistent Halogenated Compounds in Waterbirds from an e-Waste Recycling Region in South China. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 2, p. 306–311, 15 jan. 2009.

LUO, Y. *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in road and farmland soils from an e-waste recycling region in Southern China: Concentrations, source profiles, and potential dispersion and deposition. **Science of The Total Environment**, v. 407, n. 3, p. 1105–1113, 15 jan. 2009.

MAN, M.; NAIDU, R.; WONG, M. H. Persistent toxic substances released from uncontrolled e-waste recycling and actions for the future. **Science of The Total Environment**, v. 463–464, p. 1133–1137, out. 2013.

MANATKAR, P. A.; DESHMUKH, G. P. USE OF NON-METALLIC E-WASTE AS A COARSE AGGREGATE IN A CONCRETE. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 04, n. 03, p. 242–246, 25 mar. 2015.

MARCHETTI, A. *et al.* Indoor environmental quality index for conservation environments: The importance of including particulate matter. **Building and Environment**, v. 126, n. 2017, p. 132–146, 2017.

MARQUES, A. C.; MARRERO, J. M. C.; MALFATTI, C. DE F. A review of the recycling of non-metallic fractions of printed circuit boards. **SpringerPlus**, v. 2, n. 1, p. 1–11, 2013.

MARTINS, C. H.; ALTOÉ, S. P. S. Assessment of ashes from sugar cane bagasse in the manufacture of concrete pavers | Avaliação da utilização da cinza de bagaço de canade-açúcar na confecção de blocos de concreto para pavimentação. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 8, p. 39–54, 2015.

MATTERA, M.; LÓPEZ-PORTILLO, M. D. P.; GAVA, L. Government's role in ensuring sustainable waste management: Valencia's case from the triple bottom line perspective. **E3S Web of Conferences**, v. 167, p. 06001, 24 abr. 2020.

MCCARTHY, E.; FLICK, S.; MÉRIDA, W. Response surface methods for membrane

- humidifier performance. **Journal of Power Sources**, v. 239, p. 399–408, out. 2013.
- MCLAUGHLIN, J. S. Teaching environmental sustainability while transforming study abroad. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 1, p. 1–13, 2021.
- MCLEAN, R. A.; ANDERSON, V. L. Extreme Vertices Design of Mixture Experiments. **Technometrics**, v. 8, n. 3, p. 447–454, ago. 1966.
- MEDEIROS, J. F. DE; RIBEIRO, J. L. D.; CORTIMIGLIA, M. N. Success factors for environmentally sustainable product innovation: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 76–86, 2014.
- MEFTEH, H. *et al.* Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 282–288, set. 2013.
- MIKAMI, R. J. **LIXIVIAÇÃO DE SULFATO E METAIS PESADOS EM CONCRETO PERMEÁVEL PRODUZIDO COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**. [s.l.] Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2017.
- MIZOBATA, K. K. G. DA S.; CASSIOLATO, A. M. R.; MALTONI, K. L. CRESCIMENTO DE MUDAS DE BARU E GONÇALO-ALVES EM SOLO DEGRADADO, SUPLEMENTADO COM RESÍDUO, EM ILHA SOLTEIRA - SP. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 429, 29 jun. 2017.
- MODOLO, R. C. E. *et al.* Bottom ash from biomass combustion in BFB and its use in adhesive-mortars. **Fuel Processing Technology**, v. 129, p. 192–202, jan. 2015.
- MOLIN FILHO, R. G. D.; LONGHI, D. A.; *et al.* Self-compacting mortar with sugarcane bagasse ash: development of a sustainable alternative for Brazilian civil construction. **Environment, Development and Sustainability**, v. 21, n. 5, p. 2125–2143, 2019.
- MOLIN FILHO, R. G. D.; COLPINI, L. M. S.; *et al.* Characterization of different sugarcane bagasse ashes generated for preparation and application as green products in civil construction. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21, n. 8, p. 1687–1698, 2 out. 2019.
- MUHAMMAD, M. A. Effect of High Temperature on Mechanical Properties of Rubberized Concrete Using Recycled Tire Rubber as Fine Aggregate Replacement. **Engineering and Technology Journal**, v. 36, n. 8A, 25 ago. 2018.

MYERS, R. H.; KHURI, A. I.; CARTER, W. H. Response Surface Methodology: 1966-1988. **Technometrics**, v. 31, n. 2, p. 137–157, 27 dez. 1989.

N. PERKINS, D. *et al.* E-Waste: A Global Hazard. **Annals of Global Health**, v. 80, n. 4, p. 286, 25 nov. 2014.

NAGAJOTHI, P. G.; FELIXKALA, T. Compressive Strength of Concrete Incorporated with E-fiber Waste. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 4, n. 4, p. 23–27, 2014.

NING, J.-H.; ZHOU, Y.-D.; FANG, K.-T. Discrepancy for uniform design of experiments with mixtures. **Journal of Statistical Planning and Inference**, v. 141, n. 4, p. 1487–1496, abr. 2011.

NNOROM, I. C.; OSIBANJO, O. Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 6, p. 843–858, abr. 2008.

NUAKLONG, P.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2300–2307, jan. 2016.

OLIVEIRA ANDRADE, J. J. DE *et al.* Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 159–168, ago. 2018.

OLIVEIRA, F. A. DE *et al.* Portfolio optimization using Mixture Design of Experiments: Scheduling trades within electricity markets. **Energy Economics**, v. 33, n. 1, p. 24–32, jan. 2011.

ONUAGULUCHI, O.; PANESAR, D. K. Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. **Journal of Cleaner Production**, v. 82, p. 125–131, nov. 2014.

ORLINS, S.; GUAN, D. China's toxic informal e-waste recycling: Local approaches to a global environmental problem. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, n. 2016, p. 71–80, fev. 2016.

OTTO, S. *et al.* The economy of E-waste collection at the individual level: A practice oriented approach of categorizing determinants of E-waste collection into behavioral costs

and motivation. **Journal of Cleaner Production**, v. 204, p. 33–40, dez. 2018.

PANIZZON, T.; REICHERT, G. A.; SCHNEIDER, V. E. Avaliação da geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEEs) em uma universidade particular. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 625–635, ago. 2017.

PAZ, D. H. F. DA *et al.* Analysis of sustainability indicators on the management construction sites CDW in Recife, Brazil. v. 19 F, p. 1377–1389, 2014.

PAZ, L. A. F. DA; SANTOS, V. D. DOS. Reuse of glass in concrete: a study of the production and mechanical performance of resistance. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 23, p. 23, 1 jun. 2019.

PELISSER, F. *et al.* Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6–7, p. 757–763, abr. 2011.

POMA, G. *et al.* Occurrence of organophosphorus flame retardants and plasticizers in wild insects from a former e-waste recycling site in the Guangdong province, South China. **Science of The Total Environment**, v. 650, p. 709–712, fev. 2019.

QUEIRUGA, D.; GONZÁLEZ BENITO, J.; LANNELONGUE, G. Evolution of the electronic waste management system in Spain. **Journal of Cleaner Production**, v. 24, p. 56–65, mar. 2012.

RAJPUT, K.; GUPTA, A.; HI, A. RE-CYCLE OF E-WASTE IN CONCRETE BY PARTIAL REPLACEMENT OF COARSE AGGREGATE. **Engineering Heritage Journal**, v. 3, n. 1, p. 05–08, 1 fev. 2019.

RANGEL, C. S. *et al.* Generalized quality control parameter for heterogenous recycled concrete aggregates: A pilot scale case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 589–601, jan. 2019.

REIS, J. M. L.; JURUMENHA, M. A. G. Investigation on the effects of polymer impregnated aggregate on polymer mortars properties. **Materials and Structures**, v. 46, n. 8, p. 1383–1388, 27 ago. 2013.

ROBINSON, B. H. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. **Science of The Total Environment**, v. 408, n. 2, p. 183–191, dez. 2009.

RODRIGUES, A. C.; GUNTHER, W. M. R.; BOSCOV, M. E. G. Estimativa da geração de

resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos de origem domiciliar: proposição de método e aplicação ao município de São Paulo, São Paulo, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 437–447, set. 2015.

ROSADO, L. P. *et al.* Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. **Waste Management**, v. 85, p. 477–489, fev. 2019.

ROYCHAND, R. *et al.* A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117651, mar. 2020.

SAIEG, P. *et al.* Interactions of Building Information Modeling, Lean and Sustainability on the Architectural, Engineering and Construction industry: A systematic review. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 788–806, 2018.

SAKAI, K. Sustainability. **Structural Concrete**, v. 12, n. 1, p. 3–4, 2011.

SALES, A. *et al.* Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2446–2453, dez. 2010.

SAMPAIO, Z. L. M.; SOUZA, P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G. Analysis of the influence of the sugar cane bagasse ashes on mechanical behavior of concrete Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos. v. 7, n. 4, p. 626–636, 2014.

SANTANA, V. S.; OLIVEIRA, R. P. [Health and work in the construction industry in an urban area of Brazil]. **Cadernos de saude publica**, v. 20, n. 3, p. 797–811, 2004.

SCHEFFÉ, H. Experiments with Mixtures. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, v. 20, n. 2, p. 344–360, jul. 1958.

SENTHIL KUMAR, K. *et al.* Assessment of Radioactivity in Concrete Made with e-Waste Plastic. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 46, n. 2, p. 20160006, 1 mar. 2018.

SENTHIL KUMAR, K.; BASKAR, K. Briefing: Shear strength of concrete with E-waste plastic. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v. 168, n. 2, p. 53–56, abr. 2015.

SHEN, C. *et al.* Dioxin-like compounds in agricultural soils near e-waste recycling sites from

- Taizhou area, China: Chemical and bioanalytical characterization. **Environment International**, v. 35, n. 1, p. 50–55, jan. 2009.
- SHI, X. S. *et al.* Mechanical properties and microstructure analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete. **Journal of Hazardous Materials**, v. 237–238, p. 20–29, out. 2012.
- SHUVA, M. A. H. *et al.* **Thermodynamics data of valuable elements relevant to e-waste processing through primary and secondary copper production: A review** **Journal of Cleaner Production** Elsevier Ltd, , set. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.061>>
- SILVA, J. L. DA *et al.* Influence of the partial substitution of fine aggregate by granite powder in mortar on the process of natural carbonation. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 3, p. 254–262, 30 mar. 2020.
- SILVEIRA, G. T. R.; CHANG, S.-Y. Cell phone recycling experiences in the United States and potential recycling options in Brazil. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2278–2291, nov. 2010.
- SNEE, R. D. Techniques for the Analysis of Mixture Data. **American Society for Quality**, v. 15, n. 3, p. 517–528, 1973.
- SOFI, A. Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete – A review. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 9, n. 4, p. 2691–2700, dez. 2018.
- SOLTANZADEH, F.; CUNHA, V. M. C. F.; BARROS, J. A. O. Assessment of different methods for characterization and simulation of post-cracking behavior of self-compacting steel fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116704, 2019.
- SONG, Q.; LI, J. A review on human health consequences of metals exposure to e-waste in China. **Environmental Pollution**, v. 196, p. 450–461, jan. 2015.
- SOUZA, R. G. DE *et al.* Definition of sustainability impact categories based on stakeholder perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 41–51, out. 2015.
- SOUZA, R. G. DE *et al.* Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. **Waste Management**, v. 57, p. 46–56, nov. 2016.
- STHIANNOPKAO, S.; WONG, M. H. Handling e-waste in developed and developing

countries: Initiatives, practices, and consequences. **Science of The Total Environment**, v. 463–464, p. 1147–1153, out. 2013.

STREICHER-PORTE, M. *et al.* Key drivers of the e-waste recycling system: Assessing and modelling e-waste processing in the informal sector in Delhi. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 25, n. 5, p. 472–491, jul. 2005.

SUCHORAB, Z.; FRANUS, M.; BARNAT-HUNEK, D. Properties of Fibrous Concrete Made with Plastic Optical Fibers from E-Waste. **Materials**, v. 13, n. 10, p. 2414, 25 maio 2020.

SUN, Z. H. I. *et al.* Characterisation of metals in the electronic waste of complex mixtures of end-of-life ICT products for development of cleaner recovery technology. **Waste Management**, v. 35, p. 227–235, jan. 2015.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272–292, maio 2018.

TANG, X. *et al.* Heavy metal and persistent organic compound contamination in soil from Wenling: An emerging e-waste recycling city in Taizhou area, China. **Journal of Hazardous Materials**, v. 173, n. 1–3, p. 653–660, 15 jan. 2010.

TONET, K. G.; GORNINSKI, J. P. Polymer concrete with recycled PET: The influence of the addition of industrial waste on flammability. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 378–389, mar. 2013.

TONG, X. *et al.* Towards an inclusive circular economy: Quantifying the spatial flows of e-waste through the informal sector in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, n. October 2017, p. 163–171, ago. 2018.

TOUFIGH, V.; JAFARI, A. Developing a comprehensive prediction model for compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete (FAGC). **Construction and Building Materials**, v. 277, p. 122241, mar. 2021.

TREGGER, N. *et al.* Correlating dynamic segregation of self-consolidating concrete to the slump-flow test. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 499–505, 2012.

VINODH, S.; RATHOD, G. Integration of ECQFD and LCA for sustainable product design. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 8, p. 833–842, maio 2010.

WANG, J. *et al.* Brominated flame retardants in house dust from e-waste recycling and urban areas in South China: Implications on human exposure. **Environment International**, v. 36, n. 6, p. 535–541, ago. 2010.

WANG, W. *et al.* Barriers for household e-waste collection in China: Perspectives from formal collecting enterprises in Liaoning Province. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 299–308, jun. 2017.

WANG, Z.; GUO, D.; WANG, X. Determinants of residents' e-waste recycling behaviour intentions: Evidence from China. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, n. February 2009, p. 850–860, nov. 2016.

WIDMER, R. *et al.* Global perspectives on e-waste. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 25, n. 5, p. 436–458, jul. 2005.

WILLIAM, M. *et al.* Evaluation of Production in Seasonality Periods : Analysis of the Construction. n. June, p. 278–300, 2013.

WONG, C. S. C.; WU, S. C.; *et al.* Trace metal contamination of sediments in an e-waste processing village in China. **Environmental Pollution**, v. 145, n. 2, p. 434–442, jan. 2007.

WONG, C. S. C.; DUZGOREN-AYDIN, N. S.; *et al.* Evidence of excessive releases of metals from primitive e-waste processing in Guiyu, China. **Environmental Pollution**, v. 148, n. 1, p. 62–72, jul. 2007.

WU, J.-P. *et al.* Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in wild aquatic species from an electronic waste (e-waste) recycling site in South China. **Environment International**, v. 34, n. 8, p. 1109–1113, nov. 2008.

\_\_\_\_\_. Polychlorinated biphenyls in apple snails from an abandoned e-waste recycling site, 2010–2016: A temporal snapshot after the regulatory efforts and the bioaccumulation characteristics. **Science of The Total Environment**, v. 650, p. 779–785, fev. 2019.

WU, J. P. *et al.* Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in wild aquatic species from an electronic waste (e-waste) recycling site in South China. **Environment International**, v. 34, n. 8, p. 1109–1113, 2008.

WU, W. *et al.* Regional risk assessment of trace elements in farmland soils associated with improper e-waste recycling activities in Southern China. **Journal of Geochemical**

**Exploration**, v. 192, n. October 2016, p. 112–119, 2018.

WU, Z. *et al.* Biodegradation of decabromodiphenyl ether (BDE 209) by a newly isolated bacterium from an e-waste recycling area. **AMB Express**, v. 8, n. 1, p. 27, 24 dez. 2018.

XIONG, M.-X. *et al.* Effects of coarse aggregates on physical and mechanical properties of C170/185 ultra-high strength concrete and compressive behaviour of CFST columns.

**Construction and Building Materials**, v. 240, p. 117967, abr. 2020.

XU, C. *et al.* Spatial distributions and transport implications of short- and medium-chain chlorinated paraffins in soils and sediments from an e-waste dismantling area in China.

**Science of The Total Environment**, v. 649, p. 821–828, fev. 2019.

XU, X. *et al.* Blood concentrations of lead , cadmium , mercury and their association with biomarkers of DNA oxidative damage in preschool children living in an e-waste recycling area. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 40, n. 4, p. 1481–1494, 2018.

YANG, D. *et al.* Completely separating metals and nonmetals from waste printed circuit boards by slurry electrolysis. **Separation and Purification Technology**, v. 205, n. January, p. 302–307, out. 2018.

ZAHIRI, F.; ESKANDARI-NADDAF, H. Optimizing the compressive strength of concrete containing micro-silica, nano-silica, and polypropylene fibers using extreme vertices mixture design. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 13, n. 4, p. 821–830, 10 ago. 2019.

ZENG, X. *et al.* Solving e-waste problem using an integrated mobile recycling plant. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 55–59, mar. 2015.

ZENG, Z. *et al.* Lead exposure is associated with risk of impaired coagulation in preschool children from an e-waste recycling area. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 21, p. 20670–20679, 12 jul. 2018.

ZERBINO, R.; GIACCIO, G.; ISAIA, G. C. Concrete incorporating rice-husk ash without processing. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 371–378, jan. 2011.

ZHANG, K.; SCHNOOR, J. L.; ZENG, E. Y. E-Waste Recycling: Where Does It Go from Here? **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 20, p. 10861–10867, 16 out. 2012.

ZHANG, M. *et al.* The Optimization of the Water Footprint and Strength Properties of

Handsheets by the Extreme Vertices Mixture Design. **BioResources**, v. 10, n. 3, p. 5830–5844, 28 jul. 2015.

ZHAO, G. *et al.* PBBs, PBDEs, and PCBs levels in hair of residents around e-waste disassembly sites in Zhejiang Province, China, and their potential sources. **Science of The Total Environment**, v. 397, n. 1–3, p. 46–57, jul. 2008.

ZHAO, T. *et al.* Deposition flux and mass inventory of polychlorinated biphenyls in sediments of the Yangtze River Estuary and inner shelf, East China Sea: Implications for contributions of large-river input and e-waste dismantling. **Science of The Total Environment**, v. 647, p. 1222–1229, jan. 2019.

ZHENG, L. *et al.* Blood lead and cadmium levels and relevant factors among children from an e-waste recycling town in China. **Environmental Research**, v. 108, n. 1, p. 15–20, set. 2008.