

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL – *CAMPUS* ERECHIM
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

MATHEUS KOLASSA

**INCORPORAÇÃO DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO COMO AGREGADO
MIÚDO NA FABRICAÇÃO DO CONCRETO PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL**

ERECHIM

2019

MATHEUS KOLASSA

**INCORPORAÇÃO DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO COMO AGREGADO
MIÚDO NA FABRICAÇÃO DO CONCRETO PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: Prof. Ms. Pedro Eugênio Gomes Boehl

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf

ERECHIM

2019

MATHEUS KOLASSA

**INCORPORAÇÃO DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO COMO AGREGADO
MIÚDO NA FABRICAÇÃO DO CONCRETO PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

_____/_____/_____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Ms. Pedro Eugênio Gomes Boehl - UFFS
Orientador

Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf - UFFS
Coorientador

Prof. Lierson Borges de Castro - UFFS

Prof. Dr. Paulo Hartmann – UFFS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os funcionários da Universidade Federal da Fronteira Sul, que proporcionaram um ambiente propício para o desenvolvimento do curso e do meu trabalho de conclusão de curso. Agradeço também a todos os técnicos do Laboratório de Materiais, Estrutura e Restauo e do Laboratório de Geologia, Geomorfologia, Física e Química dos Solos por todo suporte oferecido durante a etapa experimental do meu projeto.

Agradeço a todos os professores, por todos os conselhos e ajuda durante a graduação e elaboração do meu trabalho de conclusão de curso. Quero agradecer de forma especial, o professor orientador Pedro Eugênio Gomes Bohel, o professor coorientador Eduardo Pavan Korf e o professor Paulo Hartmann, por todo empenho e disponibilidade ao longo da elaboração do meu projeto final.

Agradeço imensamente aos meus pais, Hilário José Kolassa e Shirlei Maria Moreto Kolassa, pelo apoio e incentivo desde o começo da graduação até o presente momento, sinto-me orgulhoso por ser o primeiro membro da família a graduar-se e poder realizar um sonho que era de todos. À minha namorada, Janine Carla Pavan, por estar ao meu lado e me aconselhar durante os momentos mais desafiadores da graduação, certamente me tornei mais capaz ao lado dela. Aos meus colegas de graduação, que hoje são amigos, por todos os momentos de dificuldade e alegria compartilhados durante o período acadêmico. Agradeço também a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Na construção civil, a substituição de agregados na fabricação do concreto é uma maneira de reutilização de materiais, diminuição do acúmulo e destinação final do resíduo. A contemporânea revolução tecnológica é responsável pelo crescente aumento na geração de resíduos eletroeletrônicos. É latente a necessidade de sugerir novas estratégias de coleta, manuseio, descarte e remediação do lixo eletrônico. A presente dissertação objetiva avaliar a possibilidade da substituição do agregado miúdo (areia) pelo resíduo eletroeletrônico, mais especificamente a placa de circuito impressa, no concreto, para a utilização na construção civil. Para tanto, comparou-se a resistência à compressão simples e a deformação, alcançadas através de ensaios de compressão simples, das amostras sem e com 2% e 5% de substituição do resíduo eletrônico pelo agregado miúdo, como também realizou-se um ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para todas as porcentagens de substituição, as rupturas apresentaram-se de forma colunar. Os valores médios de resistência à compressão simples e deformação, obtidos nos ensaios foram, respectivamente: sem substituição, 10,98 Mpa; 4,40 mm; 2% de substituição, 12,59 MPa; 2,27 mm; 5% de substituição, 10,01 MPa; 2,70 mm. Através de análise estatística pôde-se constatar que a substituição do agregado miúdo pelo resíduo eletroeletrônico agrega resistência ao concreto para 2% de substituição, e não compromete a resistência para substituições com 5% de resíduo. Em relação à deformação, os corpos de prova com substituição apresentaram uma significativa diferença para os corpos de prova sem substituição. Para os corpos de prova com 2% de substituição os resultados de deformação foram levemente menores se comparados com os corpos de prova com 5% de substituição. Considera-se a possibilidade de liberação de metais pesados, componentes das placas de circuito impresso, na estrutura sólida do concreto, o que pode ser constatado pela microscopia eletrônica de varredura.

Palavras-Chave: Resíduo Eletroeletrônico. Resistência. Reutilização.

ABSTRACT

In civil construction, substitution of aggregates in concrete manufacturing is a way of reusing materials, reducing accumulation and final disposal of waste. The contemporary technological revolution, which produces and consumes equipment in large scale, is responsible for the growing increase in the generation of electronic waste. There is a latent need to suggest new strategies for the collection, handling, disposal and remediation of electronic waste, which already represents more than 5% of urban waste. The present work aims to evaluate the possibility of replacing the fine aggregate (sand) with the electro-electronic waste, specifically the printed circuit board, in concrete, for use in civil construction. For this purpose, the simple compressive strength and deformation achieved by the simple compression test of the samples were compared without and with 2% and 5% substitution of the electronic residue, as well as Scanning electron microscopy test. For all replacement percentages, the ruptures were columnar. The average values of simple compressive strength and strain obtained in the tests were, respectively: 0% replacement, 10.98 Mpa; 4.40 mm; 2% replacement 12.59, MPa; 2.27 mm; 5% replacement, 10.01 MPa; 2.70 mm. Statistical analysis showed that the substitution of fine aggregate by electro-electronic waste adds resistance to concrete for 2% of substitution, and does not compromise the resistance for substitutions with 5% of residue. Regarding the deformation, the specimens with substitution presented a significant difference for the specimens without substitution. For specimens with 2% replacement the results deformation were slightly lower compared to specimens with 5% replacement. The possibility of releasing heavy metals, components of the printed circuit boards, in the solid concrete structure is considered, which can be verified by scanning electron microscopy.

Keywords: Electro-Electronic Waste. Structural resistance. Reuse

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma representando os procedimentos envolvidos.....	17
Figura 2 – Placas de circuito impresso utilizadas.....	19
Figura 3 – Placas de circuito impresso trituradas.....	20
Figura 4 – Moldes utilizados na fabricação do concreto.....	22
Figura 5 – Mistura areia, cimento e placas de circuito impresso.....	24
Figura 6 – Prensa Hidráulica, de carga máxima de 2000 kN, utilizada para o rompimento dos corpos de prova.....	26
Figura 7 – Microscópio eletrônico de varredura utilizado nas análises MEV, com aproximação de 15 à 300 mil vezes.....	27
Figura 8 – Esboço dos tipos de rupturas resultantes de análise de resistência à compressão simples.....	30
Figura 9 – Ruptura do corpo de prova sem substituição do agregado miúdo.....	31
Figura 10 – Tipo de ruptura do corpo de prova com substituição de 2% e 5%.....	32
Figura 11 – Gráfico representando a resistência à compressão simples de acordo com a porcentagem de adição do resíduo eletroeletrônico.....	34
Figura 12 – Comportamento da resistência à compressão simples em relação a porcentagem de adição das placas de circuito impresso.....	35
Figura 13 – Gráfico representando a deformação vertical de acordo com a porcentagem de adição do resíduo eletroeletrônico.....	37
Figura 14 – Microscopias das amostras analisadas.....	38
Figura 15 – Análise semi-quantitativa da composição com 2% de substituição, para 4 pontos específicos analisados.....	40
Figura 16 – Mapa químico com os 4 pontos específicos analisados.....	41

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Porcentagem e peso da PCI incorporada em cada amostra do experimento.....	23
Tabela 2 – Análise granulométrica da areia, para posterior classificação e caracterização.....	28
Tabela 3 – Quantidade de PCI substituído pela areia na fabricação dos blocos.....	29
Tabela 4 – Análise granulométrica da PCI para posterior classificação e caracterização.....	29
Tabela 5 – Análise granulométrica da brita para posterior classificação e caracterização.....	29
Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão para os corpos de prova.....	33
Tabela 7 – Resultados do teste de análise de variância (ANOVA).....	34
Tabela 8 – Resultados da deformação vertical no momento da ruptura dos corpos de prova..	36
Tabela 9 – Composição do concreto com resíduo eletroeletrônico.....	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	RECICLAGEM DO RESÍDUO ELETRÔNICO	14
2.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	15
2.3	OBJETIVOS	15
2.3.1	Objetivos específicos	15
3	METODOLOGIA	16
3.1	PROCESSO DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	16
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS NOS CORPOS DE PROVA	17
3.2.1	Areia	17
3.2.2	Placas de Circuito Impresso	18
3.2.3	Brita	20
3.2.4	Cimento	21
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	22
3.3.1	Moldagem dos corpos de prova	22
3.3.2	Resistência mecânica à compressão simples	24
3.3.3	Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	26
3.3.4	Análise de Variância (ANOVA)	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA AREIA.....	28
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	29
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA BRITA	29
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	30
4.4.1	Resistência à compressão simples sem substituição do agregado	30
4.4.2	Resistência à compressão simples com 2% e 5% de substituição do agregado	31
4.5	ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	32
4.5.1	Análise de Variância (ANOVA)	34
4.6	ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES DURANTE ENSAIO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	36
4.7	ANÁLISE DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	37
5	CONCLUSÕES	42
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

As modificações ambientais acontecem por diversas causas, uma grande quantidade denominada natural e outras ocorrem através de intervenção antropológica. É notório que o desenvolvimento tecnológico e a cultura social têm colaborado para que alterações no meio ambiente aconteçam e se intensifiquem (FERNANDEZ, 2004).

Para Natume e Sant'ana (2011), o aumento na geração de resíduos eletroeletrônicos é resultado da revolução tecnológica contemporânea que fabrica equipamentos em larga escala, com inúmeras utilidades. Resultando em uma quantidade e variedade de equipamentos, que por se tornarem obsoletos em um curto prazo de tempo, representam uma parcela considerável dos resíduos descartados. Ainda para os autores, estes resíduos eletroeletrônicos configuram-se perigosos devido à sua composição variada, principalmente de metais pesados que causam problemas ao ser humano, aos animais e vegetais, águas subterrâneas e outros.

Conforme Rodrigues (2007), “a dificuldade na gestão dos resíduos sólidos tem sido considerada como um dos mais graves problemas da atualidade.” Também, de acordo com o autor, as limitações na recuperação de materiais não renováveis, a pouca implantação e criação de alternativas de reciclagem e tratamento formam hoje um enorme desafio, principalmente para países em desenvolvimento.

O lixo eletrônico ou “*e-waste*”, termo em inglês, compreende produtos eletrônicos descartados ou obsoletos como computadores pessoais, televisores, celulares, aparelhos de som, aparelhos de fax, copiadoras, etc (MATTOS, et al. 2008).

Acompanhado dos benefícios e riquezas vindos com as tecnologias de informação e comunicação, surge uma realidade de poluição (MATTOS, et al. 2008).

Há um paradoxo que precisa ser solucionado em curto prazo: como resolver a problemática de uma produção que cresce cada vez mais e um mercado que disponibiliza equipamentos de última tecnologia cada vez mais acessíveis, com o grande desperdício de recursos naturais e a poluição do meio ambiente causados pelo próprio sistema de produção dos equipamentos e pelo acelerado processo de descarte dos mesmos (GONÇALVES, 2007)? Seja devido à sua rápida obsolescência ou por estarem deteriorados, esses materiais são descartados em aterros sanitários ou outros locais inapropriados.

Quando existe a reciclagem destes materiais, as iniciativas são as mais simples e precárias. Junto a isso, não pode-se dizer que existe uma política de regularização destes detritos. Existe somente um pequeno conjunto de dispositivos legais que não atendem de

forma satisfatória as necessidades de preservação ambiental, causando danos já constatados à própria saúde humana, inclusive nos países considerados desenvolvidos (GONÇALVES, 2007).

Para Santos e Souza (2010), técnicas para um tratamento mais adequado desse tipo de material têm sido desenvolvidas. Porém, de acordo com os autores, há diversos processos de decomposição e separação dos elementos presentes na placa, que não apresentam viabilidade para o montante de resíduo eletrônico que atualmente existe.

Seguindo essa problemática, o presente estudo tem o propósito de reaproveitar uma parte do lixo eletrônico, denominada placa de circuito impresso (PCI), incorporando-a como agregado na fabricação do concreto. A fim de oferecer uma destinação alternativa ambientalmente adequada para esse tipo de resíduo, como também promover o reaproveitamento de um material descartado e agregá-lo à um novo produto.

“As placas de circuito impresso são compostas por resinas ou compostos orgânicos além de considerável número de elementos distintos. Constitui em torno de 3% do peso total de todo lixo eletrônico descartado” (SANTOS; SOUZA, 2010).

Pelo menos $\frac{3}{4}$ do volume do concreto é composto por agregados (NEVILLE; BROOKS, 2016). Os agregados podem limitar a resistência do concreto, e suas propriedades físicas, térmicas e químicas afetam significativamente a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto (NEVILLE; BROOKS, 2016).

Os agregados têm um custo menor que o cimento, então é econômico utilizá-los na maior quantidade possível. Além da economia, o uso de agregados apresenta vantagens técnicas consideráveis ao concreto, que tem maior estabilidade de volume e maior durabilidade (NEVILLE; BROOKS, 2016).

Considerando as características perigosas da placa de circuito impresso, presente no resíduo eletrônico, e almejando uma possível destinação adequada para o mesmo, o projeto tem a pretensão de inseri-lo na fabricação de concreto.

2 REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

Em 1991, na Suíça, foi implementado o primeiro sistema de reciclagem eletrônica, iniciando pela coleta de eletro-eletrônicos usados e refrigeradores descartados. No decorrer dos anos, todos os outros equipamentos elétricos e eletrônicos foram gradualmente inseridos ao sistema. Com uma legislação aplicada no país em 1998, foi possível efetuar a devolução de

todos os resíduos eletrônicos aos pontos de venda e outros pontos de coleta gratuitos (SHAMIM, et al. 2015).

Na Suíça existem dois estabelecimentos com o gerenciamento desses resíduos, denominados de PRO's (Producer Responsibility Organizations): Associação Econômica Suíça para os Fornecedores de Informação, Comunicação e Tecnologia Organizacional (SWICO), e Fundação Suíça para Gerenciamento de Resíduos (SENS), responsável principalmente por aparelhos elétricos (SHAMIM, et al. 2015).

Portanto, existem políticas públicas, principalmente em países desenvolvidos, que são eficazes na solução e diminuição dos problemas causados pelo lixo eletrônico (SHAMIM, et al. 2015). Contudo, com a crescente produção eletrônica no mundo, muitos países não têm capacidade para administrar a grande quantidade de lixo eletrônico que são geradas anualmente com a sua característica perigosa (SHAMIM, et al. 2015).

O relatório "*Global E-Waste Monitor 2017*", feito por UIT (Internacional Telecommunications Union), Universidade da ONU e Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA), enfatiza os crescentes volumes de lixo eletrônico e seu descarte e tratamento impróprios por meio de queimadas ou lançamento em lixões.

De acordo com o relatório, em 2016, foram gerados 44,7 milhões de toneladas métricas de resíduos eletrônicos, um aumento de 8% se comparado com 2014. Há um crescimento previsto em mais de 17%, para 52,2 milhões de toneladas métricas, até 2021.

Apesar da temática do lixo eletrônico ser regulamentada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) através da Lei 12.305 de 2010, que surgiu como uma possível solução ou minimização dos seus impactos, seu prazo inicial de implantação era o ano de 2014.

O prazo estipulado não foi cumprido pelos municípios, e posteriormente foi aprovado pela Câmara de Deputados um acréscimo de quatro anos ao prazo inicial, através da Medida Provisória 651/14, estendendo-o até o ano de 2018. Há certa dificuldade por parte do poder público, considerando que as ações e penalidades dispostas na lei e que deveriam ser exigidas não existem ou são ineficazes.

Essas preocupações exigem a necessidade de revisar os fatos de pesquisas recentes e sugerir planos de coleta, manuseio, descarte e remediação de lixo eletrônico, o qual, segundo Shamim, et al. (2015), já constitui mais de 5% dos resíduos urbanos.

No estudo realizado por Naia (2014), foi avaliado o encapsulamento de algumas substâncias perigosas em blocos de concreto como técnica eficaz para a redução da lixiviação

e solubilização de resíduos. O princípio do estudo foi o de diluir os resíduos eletrônicos em blocos de cimento que seriam destinados à vedação na construção civil, ocorrendo assim, o efeito do encapsulamento, forma encontrada para dar destinação final ambientalmente adequada e reduzir riscos para o ser humano.

De acordo com Naia (2014), efetuados os ensaios laboratoriais, constatou-se que as características dimensionais, de resistência à compressão, de absorção de água, mantiveram-se dentro dos limites impostos pela norma aplicável, apontando para a viabilidade da proposta.

O estudo de Modro (2008) verificou a influência da incorporação de resíduos de (politereftalato de etileno) - PET - sobre a resistência mecânica em concreto de cimento Portland. Os resíduos PET foram utilizados como substitutos de parte dos agregados do concreto. Para todas as proporções analisadas pelo autor, pode-se constatar uma tendência de redução da resistência mecânica devido ao aumento da fração em volume de substituição de agregados.

Para Vogt (2017), que avaliou o potencial de redução da contaminação ambiental, após o encapsulamento em corpos de prova de concreto com substituições do agregado miúdo e graúdo por resíduo eletroeletrônico, o resíduo bruto apresenta valores superiores às amostras com substituições, para a concentração de Alumínio, Bário, Cobre, Ferro, Zinco e principalmente Chumbo, que ao serem incorporadas na massa cimentícia sofrem uma perda significativa de suas concentrações. Comprovou-se também, que através de ensaios de lixiviação e solubilização as concentrações dos principais contaminantes contidos no resíduo bruto eletroeletrônico são reduzidos consideravelmente após a diluição no concreto, o que sugere uma redução dos impactos se comparada à disposição do resíduo de forma inadequada (VOGT, 2017).

Ainda, de acordo com o estudo, a substituição de 2% para ambos os agregados apresentaram resistência à compressão superior ao concreto puro, mostrando um bom comportamento do material e a viabilidade da aplicação, principalmente em relação à substituição da areia.

Através da revisão teórica e bibliográfica constata-se que há uma escassez de estudos que se propõem a aplicar, especificamente, o resíduo eletrônico no concreto como forma de destinação final. Nota-se também, que o estudo se mostra precursor na área, indicando a necessidade de maiores colaborações científicas para que se tenha uma base de dados de apoio maior para a avaliação de sua viabilidade.

2.1 RECICLAGEM DO RESÍDUO ELETRÔNICO

No Brasil, o lixo eletrônico é definido como um resíduo sólido especial e de coleta obrigatória. Constituído de metais pesados, como chumbo, cádmio e mercúrio, substâncias altamente tóxicas, o lixo eletrônico se torna um grave problema para o meio ambiente e para a saúde (BRASIL, 2010).

Moi, et al (2012) afirmam que, cidades em que não existe ou não há eficácia no serviço de coleta e segregação dos resíduos em sua origem, é normal observarmos inadequações na disposição final do lixo. Resíduos com uma infinidade de composições são dispostos e aglomerados sem ordem ou critério e em locais indevidos (MOI, et al. 2012).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), representa um enfoque inovador entre países emergentes na implementação da Logística Reversa (LR) de Resíduos de Equipamentos Elétricos Eletrônicos (REEE). Agentes de produção, importação e vendas tornam-se corresponsáveis pelo desenvolvimento e prática de um modelo LR, sem que haja dependência do sistema de gestão de resíduos público (DEMAJOROVIC, et al. 2016).

O Art. 33º, da PNRS, no que se refere à LR, estabeleceu que os EEE e seus componentes, deverão retornar à sua origem após seu uso, por meio de mecanismos de logística reversa, sem depender dos serviços públicos de disposição de resíduos (DEMAJOROVIC, et al. 2016).

O funcionamento do sistema de LR, pela lei, deve ser definido através de acordos setoriais, que são contratos firmados entre fabricantes, importadores, distribuidores e o poder público, com o objetivo de implantar o mecanismo da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto (BRASIL, 2010).

Apesar da existência do PNRS e dos mecanismos de LR, a ausência de acompanhamento e fiscalização das políticas de reciclagem do lixo eletrônico podem acarretar em sérios desequilíbrios ambientais (MOI, et al. 2012). Devido às características dos componentes do lixo eletrônico, ele torna-se mais poluente que o lixo comum, podendo potencializar os danos ao meio ambiente (MOI, et al. 2012).

Dentre 11 países considerados em desenvolvimento, o Brasil surge em segundo lugar em geração de resíduos de computadores, com cerca de 96,8 mil toneladas/ano, sendo que em primeiro lugar está a China com 300 mil toneladas/ano (SCHLUEP, et al. 2009).

O estudo dirigido por Schluep, et al. (2009), também ressalta que o Brasil lidera as estatísticas em relação à falta de estudos e dados sobre produção, reutilização e reciclagem de eletroeletrônicos.

Mesmo sem estar implementada de maneira completa, a PNRS destaca a importância de uma mudança na gestão de toda a cadeia produtiva e ciclo de vida dos REEE (SANTOS, et al, 2014).

2.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) se caracteriza por ser uma importante ferramenta de visualização e análise de microestruturas de diferentes tipos de materiais em alta resolução (TEIXEIRA, et al. 2011). Apresenta grande relevância em análises microestruturais pelo poder de identificação e demonstração de resultados, em três dimensões, de elementos químicos que estão presentes na amostra (DEDAVID, et al. 2007).

O funcionamento do MEV se dá através da utilização de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro ao longo da superfície da amostra, ponto a ponto, por uma série de linhas e posteriormente transmitir o sinal do detector em uma tela catódica, na qual sua varredura está totalmente sincronizada com o feixe incidente (DEDAVID, et al. 2007).

Pelo sistema de bobinas de deflexão, o feixe de elétrons pode ser guiado com a finalidade de varrer a superfície da amostra de modo a formar uma malha retangular. O sinal de imagem é resultante da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. O sinal recebido pelo detector é utilizado para modular o brilho do monitor, permitindo assim, a observação (DEDAVID, et al. 2007).

A análise por EDS (Energy-Disperse X-Ray Spectroscopy) é um auxiliar muito importante do MEV na caracterização de materiais semicondutores e metálicos, porque possibilita identificar a composição de sua amostra, de forma qualitativa, em pontos específicos da imagem (CRUZ, et al. 2006).

2.3 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho foi analisar a resistência e a deformação à compressão simples de corpos de prova de concreto sem substituição e com substituição parcial do agregado miúdo (areia) por placas de circuito impresso trituradas, nas porcentagens de 2% e 5%.

2.3.1 Objetivos específicos

Pode-se elencar, como objetivos específicos do trabalho:

- a) Realizar misturas de concreto com substituição de areia (agregado miúdo) por placas de circuito impresso, averiguando se a resistência se enquadra aos padrões da construção civil, de acordo com a ABNT - NBR 5.739 de 1994;
- b) Realizar ensaios de compressão simples obtendo a resistência à compressão com 28 dias de cura;
- c) Comparar a resistência do concreto sem substituição com a resistência do concreto com a substituição em diferentes porcentagens;
- d) Classificar o tipo de ruptura obtida de acordo com o modelo proposto pela ABNT - NBR 5.739 de 1994;
- e) Avaliar o comportamento dos corpos de prova com as substituição tendo em vista a aplicação na prática da construção civil;
- f) Analisar as microestruturas formadas entre as placas de circuito impresso com os outros componentes do concreto, como também a composição química em alguns pontos da amostra, através das análises do MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura);
- g) Verificar a possibilidade da destinação final adequada da placa de circuito impresso na construção civil;

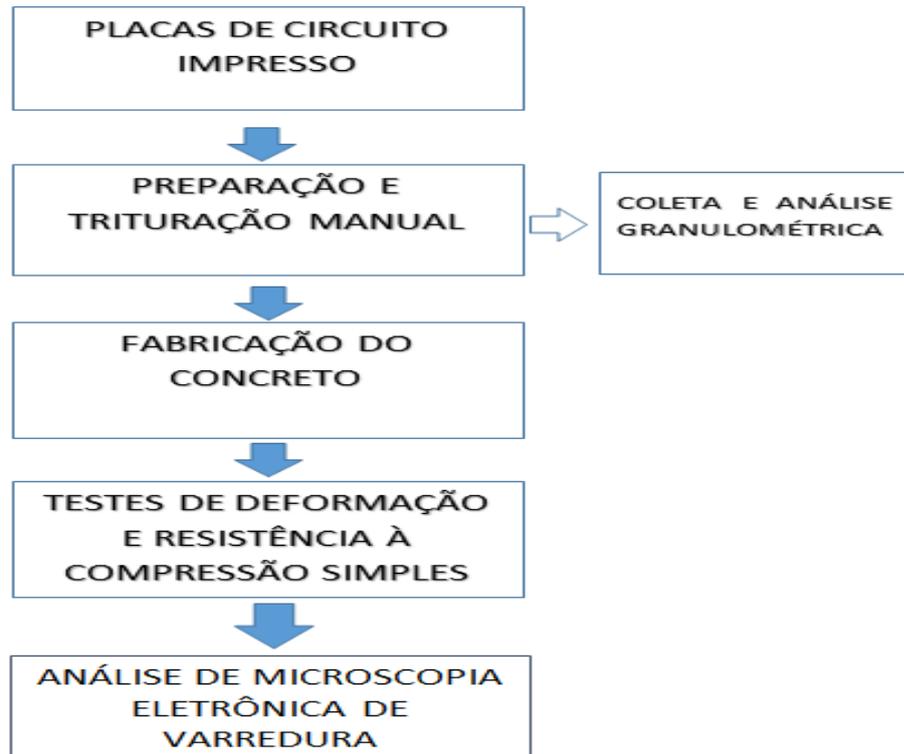
3 METODOLOGIA

Nas seções posteriores, com os itens iniciais de numeração 3, estão descritas as metodologias utilizadas na formulação e execução do presente trabalho.

3.1 PROCESSO DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

O fluxograma apresentado a seguir foi construído para uma melhor representação dos procedimentos envolvidos na realização do trabalho.

Figura 1 – Fluxograma representando os procedimentos envolvidos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NOS CORPOS DE PROVA

Nos subitens 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4, descrevem-se os materiais utilizados para a moldagem dos corpos de prova.

3.2.1 Areia

Quanto à origem do agregado miúdo, a NBR 9.935: Agregados – Terminologia (ABNT, 2011) classifica o material em distintas categorias, areia natural e areia artificial. A areia natural é resultante de ação da natureza, já a areia artificial quando proveniente de processos industriais.

O agregado miúdo natural tem como característica ser um material com forma indefinida e volume definido, normalmente inerte. O material é encontrado na natureza no formato de sedimentos não coesos ou sedimentos consolidados.

A areia pode ser considerada como o agregado miúdo que cai na peneira de número 4, com abertura de 4,8 mm.

A areia utilizada nos corpos de prova estava disponível nas dependências da Universidade Federal da Fronteira Sul, no campus Erechim/RS, que, de acordo com os técnicos responsáveis pelo setor de construção civil da universidade, tem origem nas jazidas do Rio Jacuí, Rio Grande do Sul.

Para calcular o peso específico da areia utilizou-se o seguinte método, de acordo com a Equação 1.

$$\delta = \frac{PT-PC}{VT-VC} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: δ : Peso específico da areia [g/cm³];
 PT: Peso total do cilindro com areia [g];
 PC: Peso do cilindro [g];
 VT: Volume total do cilindro com areia [cm³];
 VC: Volume do cilindro [cm³].

Para a realização do método foi pesado e calculado o volume de um recipiente cilíndrico sem areia e, posteriormente, o mesmo procedimento foi feito com areia. Então calculou-se o peso específico da areia seguindo a Equação 1.

3.2.2 Placas de Circuito Impresso

Os resíduos eletrônicos utilizados serão as placas de circuito impresso (PCI). De acordo com Santos e Souza (2010), elas são formadas por resinas além de considerável número de elementos distintos. Estas placas estão presentes na maioria dos equipamentos eletroeletrônicos, e sua composição é extremamente heterogênea contendo de uma maneira geral plásticos, cerâmicos, metais base e metais preciosos. Toda essa mistura torna sua reciclagem bastante difícil.

Segundo Veit (2005), que realizou um estudo sobre a composição das placas de circuito impresso, os componentes podem variar de acordo com a idade e o com o tipo de placa. Mas, de forma geral, a composição das placas de circuito impresso é caracterizada como:

- a) Polímeros: em sua maioria poliolefinas, poliésteres, e policarbonatos, representando em média cerca de 30% de seu peso;

- b) Óxidos refratários: representam em torno de 30% de seu peso, onde, dentro dessa porcentagem encontram-se a sílica (50%), alumina (20%) e óxidos (30%);
- c) Metais base: cerca de 40% do peso total, onde, cobre, estanho, ferro, níquel, chumbo, alumínio e zinco correspondem a respectivamente 50%, 20%, 10%, 5%, 5% e 3%;
- d) Metais preciosos: representam em torno de 1% do peso total, sendo 0,16% de prata, 0,083% de ouro e 0,004% de paládio.

Analisando as substâncias presentes nas placas de circuito impresso, o chumbo encontrado nas soldas pode causar danos nos sistema endócrino, circulatório, além de danos no sistema nervoso periférico e central, e rins. Em relação a elementos como mercúrio e cádmio, que são encontrados em baixas quantidades nas placas, esses podem causar problemas cerebrais e nos rins, respectivamente (VEIT, 2005).

As placas de circuito impresso foram coletadas através de doações e foram utilizadas no experimento como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Placas de circuito impresso utilizadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o processo de trituração foi utilizado uma morsa e uma alicate. De maneira manual, as placas de circuito impresso foram trituradas para que se obtivesse um padrão de granulometria mais regular e homogêneo. Como demonstra a Figura 3.

Figura 3 – Placas de circuito impresso trituradas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Brita

A ABNT - NBR 7.211 classifica como agregado graúdo as partículas que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. O termo brita é comumente utilizado para identificar fragmentos oriundos de rochas duras, provenientes de processos de britagem e peneiramento de partes extraídas de maciços rochosos.

As rochas mais utilizadas na produção de brita são granito, gnaíse, basalto. A classificação das britas se dá conforme as faixas granulométricas em que se encontram. Entretanto, a classificação tomada no mercado da construção civil diferencia-se da classificação normativa brasileira em relação às variações de dimensão de cada tipo de brita. As faixas granulométricas mais utilizadas na fabricação do concreto são a brita 0 e a brita 1.

A brita utilizada nos corpos de prova estava disponível nas dependências da Universidade Federal da Fronteira Sul – campus Erechim/RS, que, de acordo com os técnicos responsáveis pelo setor de construção civil da universidade, é oriunda de um britador localizado na cidade de Erechim/RS.

Foi realizada uma análise granulométrica para caracterização e classificação da brita.

Para calcular o peso específico da brita utilizou-se o seguinte método, de acordo com a Equação 2.

$$\delta = \frac{Pesototal}{Vf-Vi} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: δ : peso específico [g/cm³];

Peso total: peso total de brita na pesagem [g];

Vi: Volume de água inicial no béquer [cm³];

Vf: Volume de água final no béquer [cm³].

Para a realização do método foi pesado uma pequena quantidade da brita e após, mergulhada em um béquer com água, sabendo o volume inicial da água contida dentro do béquer e o volume final, o peso específico foi calculado seguindo a Equação 2.

3.2.4 Cimento

Por definição, o cimento Portland é constituído em sua maioria de material calcário, como giz ou rocha calcária, e de sílica e alumina encontradas em argilas. A mistura do cimento Portland com água une e envolve os agregados sendo o responsável pelas propriedades de ligante (NEVILLE; BROOKS, 2016).

Pode-se encontrar diversos tipos de cimento Portland normatizados pela ABNT - NBR, significando que cada composição apresenta características específicas.

O cimento utilizado na fabricação dos corpos de prova é classificado como comum, sendo utilizado vastamente no concreto convencional civil, é designado como Cimento Portland CP II Z 32, que de acordo a indústria fornecedora, permite boa secagem e trabalhabilidade adequada para todos tipos de obra.

A indústria responsável pela fabricação do Cimento Portland CP II Z 32 produz seguindo a norma ABNT - NBR 16.697.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.3.1 Moldagem dos corpos de prova

Para a fabricação dos blocos de concretos foram utilizados os seguintes materiais: areia, água, brita, cimento e material substituto do agregado (placas de circuito impresso). As amostras foram processadas e fabricadas nas dependências da Universidade Federal da Fronteira Sul – campus Erechim/RS, no Laboratório de Materiais, Estrutura e Restauro e no Laboratório de Geologia, Geomorfologia, Física e Química dos Solos.

A Figura 4 mostra os moldes que foram utilizados na fabricação do concreto. Tem formato cilíndrico e possui diâmetro igual a 5 cm e comprimento igual a 10 cm, com um volume igual a 196,35 cm³.

Figura 4 – Moldes utilizados na fabricação do concreto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As misturas foram feitas nas seguintes proporções:

- a) 3 corpos de prova sem substituição do agregado, para base comparativa;
- b) 3 corpos de prova com substituição do agregado miúdo em 2%;
- c) 3 corpos de prova com substituição do agregado miúdo em 5%.

A Tabela 1 descreve a porcentagem de areia substituída, o peso do resíduo e as diferentes amostras com substituição de 2% e 5%.

Tabela 1 – Porcentagem e peso da PCI incorporada em cada amostra do experimento.

Amostra	Material Substituído	%	Peso Resíduo (g)
1	-	-	-
2	-	-	-
3	-	-	-
4	Areia	2%	4,2
5	Areia	2%	4,2
6	Areia	2%	4,2
7	Areia	5%	10,5
8	Areia	5%	10,5
9	Areia	5%	10,5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Os corpos de prova foram moldados com traço 1:3:3, representando, respectivamente, cimento, areia e brita. Para a relação água-cimento, por não haver uma relação já especificada na literatura, foram realizados testes de verificação da trabalhabilidade da mistura, atingindo um valor ideal de 0,7 desta relação, para este experimento.

Para compor a mistura da massa, os materiais foram pesados individualmente.

A Figura 5 representa a mistura dos materiais de menor granulometria: areia, cimento e placas de circuito impresso, ainda sem a brita e água.

Figura 5 – Mistura da areia, cimento e placas de circuito impresso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a fabricação do concreto iniciou-se a mistura de areia, cimento e placas de circuito impresso. Depois adicionou-se $\frac{1}{2}$ da quantidade total da água utilizada, adicionou-se a brita e o restante da água. Por fim, foi feita a moldagem dos corpos de prova em cilindro desmoldante.

A etapa de enchimento dos moldes realizou-se em 3 camadas, sendo compactados sutilmente, com um compactador manual, até que se enchesse totalmente cada molde, para que não houvessem falhas ou espaços aerados no interior dos corpos de prova.

Para a cura dos moldes realizou-se o processo de secagem por 7 dias dentro dos moldes, ao ar livre. Posteriormente foi feita a desmoldagem e após, a imersão em água pelo período de 21 dias.

Todos os procedimentos realizados seguiram a norma ABNT - NBR 12.655, que recomenda que o concreto deva ter cura de 28 dias, a partir de sua concretagem.

3.3.2 Resistência mecânica à compressão simples

A resistência mecânica pode ser considerada como o principal parâmetro, ou também, o mais objetivo, para avaliação da qualidade do concreto na estrutura. A resistência à

compressão simples, avaliada por rupturas de corpos de prova moldados do concreto, representa uma resistência potencial que o concreto pode abranger na estrutura (FILHO, 2007).

O concreto pode ser dividido em: concreto de baixa resistência (concreto com resistência à compressão menor que 20 Mpa); concreto de resistência moderada (concreto com resistência à compressão entre 20 e 40 Mpa); e concreto de alta resistência (concreto com resistência à compressão acima de 40 Mpa) (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A maioria das características que se deseja no concreto relaciona-se com a resistência (NEVILLE; BROOKS, 2016).

Concretos com uso de reciclados apresentam, geralmente, resistência à compressão menor ou igual à dos concretos convencionais. A diferença entre a resistência à compressão de concretos convencionais e com uso de reciclados depende do tipo de reciclado, de sua qualidade e do consumo de cimento (LIMA, 1999).

Foi seguida a norma ABNT - NBR 5.739 do ano de 1994, para que o rompimento fosse realizado de forma adequada. A norma estabelece um método de ensaio pelo qual devem ser ensaiados à compressão os corpos de prova cilíndricos de concreto, moldados conforme a ABNT - NBR 5.738 e extraídos conforme a ABNT - NBR 7.680.

Os ensaios foram realizados na Universidade Regional Integrada - URI Erechim, Campus II, no Laboratório de Construção Civil, com supervisão do técnico responsável pelo setor.

Para que fosse mantida a verticalidade da carga de ruptura optou-se por utilizar uma borracha na parte superior de cada corpo de prova.

A prensa hidráulica, apresentada na Figura 6, utilizada nos testes de compressão simples, possui uma pressão de carga máxima de 2000 kN. Prensa profissional, indicada para testes de compressões simples de diversos materiais, mostrando a carga no momento da ruptura e a deformação de cada corpo de prova.

Figura 6 – Prensa Hidráulica, de carga máxima de 2000 kN, utilizada para o rompimento dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para realizar as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram encaminhadas amostras dos corpos de prova com 2% de substituição. O intuito consistia em examinar a composição química das amostras e sua microestrutura.

As análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, em Passo Fundo/RS, no campus da Universidade de Passo Fundo (UPF). O aparelho utilizado foi o X-Max da OXFORD Instruments, possuindo uma variação de ampliação de 15 até 300 mil vezes. A Figura 7 apresenta o aparelho utilizado.

Figura 7 – Microscópio eletrônico de varredura utilizado nas análises MEV, com aproximação de 15 à 300 mil vezes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em um primeiro momento, as amostras foram submetidas ao processo de metalização, com recobrimento em ouro. Posteriormente foram inseridas no aparelho de MEV, retornando as imagens e o *spectrum* dos pontos analisados.

3.3.4 Análise de Variância (ANOVA)

Para os resultados de resistência à compressão simples obtidos no ensaio, foi realizada uma análise de variância (ANOVA).

Análise de variância é adequada para testar a hipótese de que as médias das populações são iguais. Ponderam a importância de um ou mais fatores, comparando as médias de variáveis de resposta nos diferentes níveis de fator (MINITAB, 2019).

Complementar à ANOVA, o teste Tukey é um método usado para criar intervalos de confiança para todas as diferenças encontradas entre as médias dos níveis dos fatores, tendo controle sobre a taxa de erro global, para um nível de significância especificado (MINITAB, 2019).

Existem dois tipos de hipóteses aceitas para os resultados da análise de variância (ANOVA):

- a) Hipótese nula: afirma que todas as médias são iguais;
- b) Hipótese alternativa: afirma que, pelo menos, uma é diferente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos subitens 4.1, 4.2 e 4.3 são caracterizados de acordo com a granulometria a areia, a placa de circuito impresso e a brita. Já os subitens 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 descrevem de que forma ocorreu o ensaio de resistência à compressão simples, seus resultados e as análises estatísticas feitas sobre eles, assim como a análise de microscopia eletrônica de varredura.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA

A Tabela 2 apresenta a classificação granulométrica da areia utilizada na fabricação do concreto. Observa-se que uma considerável quantidade ficou retida entre as peneiras de 0,425 mm e 0,150 mm.

Tabela 2 – Análise granulométrica da areia, para posterior classificação e caracterização.

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	%
4,000	9,34	0,934
2,000	34,76	3,476
1,180	52,32	5,232
0,425	250,22	25,022
0,300	222,91	22,291
0,150	339,24	33,924
0,075	80,61	8,061
Materiais finos (silte)	10,60	1,060

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Com a Equação 1, foi possível determinar o peso específico da areia que foi utilizada na fabricação dos corpos e prova, apresentando um valor de 1,46 g/cm³.

A partir do peso da areia foi possível calcular a quantidade de resíduo eletrônico que deve ser substituído para cada porcentagem de substituição. Como é demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Quantidade de PCI substituído pela areia na fabricação dos blocos.

Porcentagem Substituída (%)	Massa total (g)	Massa substituída (g)
2	630,0	12,6
5	630,0	31,5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

A placa de circuito impresso foi triturada manualmente em frações granulométricas com predominância de partículas de tamanho entre 4,000 mm e 2,000 mm, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise granulométrica da PCI para posterior classificação e caracterização.

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	% retida
4,000	7,813	17,716
2,000	33,228	75,347
1,180	2,177	4,936
0,425	0,565	1,281
<0,425	0,318	0,720

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA BRITA

Na Tabela 5 pode-se observar a granulometria da brita. Nota-se que grande parte do material ficou retido na peneira de 9,50 mm e 6,30 mm.

Tabela 5 – Análise granulométrica da brita para posterior classificação e caracterização.

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	% retida
25,00	7,73	0,773
19,00	29,99	2,999
9,50	787,22	78,722
6,30	167,97	16,797
<6,30	7,08	0,708

Fonte: Elaborado pelo autor.

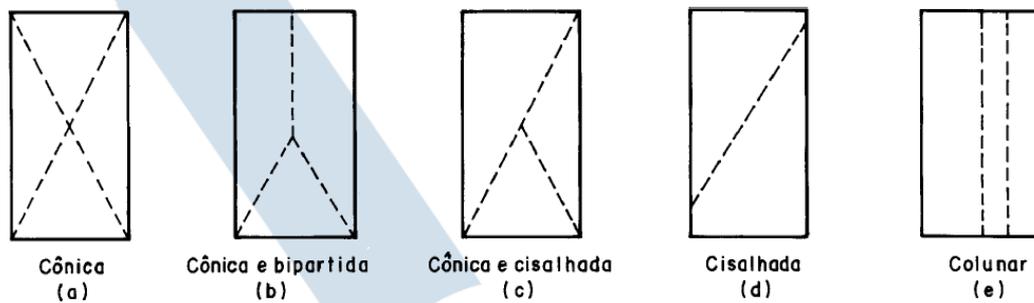
De acordo com a Equação 2, foi possível determinar o peso específico da brita, resultando em um valor de 2,23 g/cm³.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios para verificação de resistência à compressão simples foram realizados conforme as exigências da NBR 5.739.

Extraída da ABNT - NBR 5.739, a Figura 8 apresenta os principais tipos de rupturas que ocorrem em corpos de prova de concreto.

Figura 8 – Esboço dos tipos de rupturas resultantes de análise de resistência à compressão simples.



Fonte: ABNT, NBR 5.739 (1994).

Para uma melhor visualização, as análises dos resultados obtidos após a ruptura dos corpos de prova foram divididas em dois subitens, 4.4.1 e 4.4.2, sendo o primeiro sem substituição do agregado miúdo e o segundo com substituição de agregado miúdo.

4.4.1 Resistência à compressão simples sem substituição do agregado

Os corpos de prova sem substituição da areia, ou seja, sem conter placa de circuito impresso na sua composição, podem ser classificados com uma ruptura colunar (e) de acordo com a ABNT - NBR 5.739. A Figura 9 demonstra como ocorreu o rompimento do corpo de prova sem substituição do agregado miúdo.

Figura 9 – Ruptura do corpo de prova sem substituição do agregado miúdo.

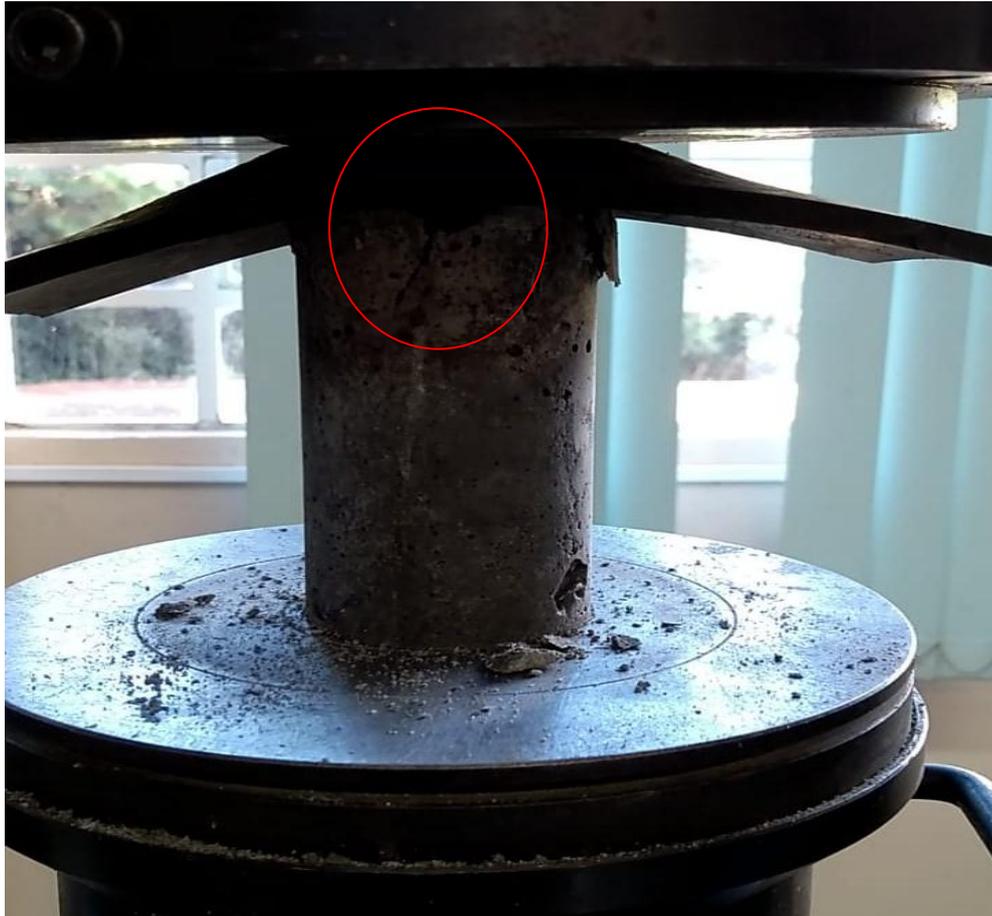


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2 Resistência à compressão simples com 2% e 5% de substituição do agregado

Os corpos de prova com 2% e 5% de substituição, apresentaram uma forma de ruptura similar ao corpo de prova sem substituição. Conforme pode-se observar, circulado em vermelho, na Figura 10, a ruptura se enquadra no modelo colunar (e) proposto pela ABNT - NBR 5.739.

Figura 10 – Tipo de ruptura dos corpos de prova com substituição de 2% e 5%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão simples no momento da ruptura dos corpos de prova, assim como a média para cada porcentagem de substituição, o desvio padrão, o coeficiente de variação e a variância. Todos os corpos de prova estavam com 28 dias no momento do teste.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão para os corpos de prova.

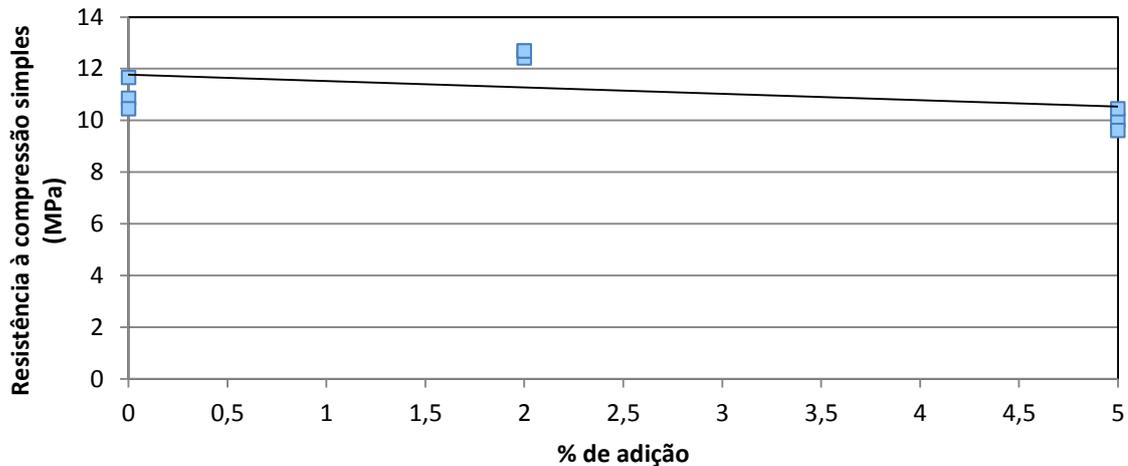
Corpo de Prova	% de substituição de placas de circuito impresso	Diâmetro (mm)	Força Máxima (kN)	Resistência à Compressão (MPa)	Média para cada % de substituição	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Variância
CP 1	0	50	21,3	10,85	10,98	0,62	5,605	0,3844
CP 2	0	50	22,9	11,65				
CP 3	0	50	20,5	10,44				
CP 4	2	50	24,4	12,41	12,59	0,16	1,238	0,0256
CP 5	2	50	24,9	12,68				
CP 6	2	50	24,9	12,68				
CP 7	5	50	19,6	10,00	10,01	0,42	4,196	0,1764
CP 8	5	50	18,8	9,60				
CP 9	5	50	20,5	10,44				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Os corpos de prova sem substituição de resíduo eletroeletrônico, apresentaram uma resistência à compressão simples média 10,98 MPa. Já os corpos de prova com substituição de 2%, apresentaram uma resistência à compressão simples média de 12,59 MPa. Os corpos de prova com substituição de 5%, apresentaram uma resistência à compressão simples média de 10,01 MPa.

A Figura 11 expõe, em forma de gráfico, o comportamento da resistência à compressão simples em relação às diferentes porcentagens de adição de resíduo eletroeletrônico.

Figura 11 – Gráfico representando a resistência à compressão simples de acordo com a porcentagem de adição do resíduo eletroeletrônico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.1 Análise de Variância (ANOVA)

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos na realização da análise de variância. O teste foi efetuado com um índice de 95% de confiança ($\alpha = 0,05$).

Tabela 7 – Resultados do teste de análise de variância (ANOVA).

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	P
Adição de resíduo (%)	10,166	2	5,083	26,31	0,001
Erro	1,159	6	0,193		
Total	11,325	8			

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Sendo que:

GL: Graus de Liberdade

SQ: Soma Quadrática

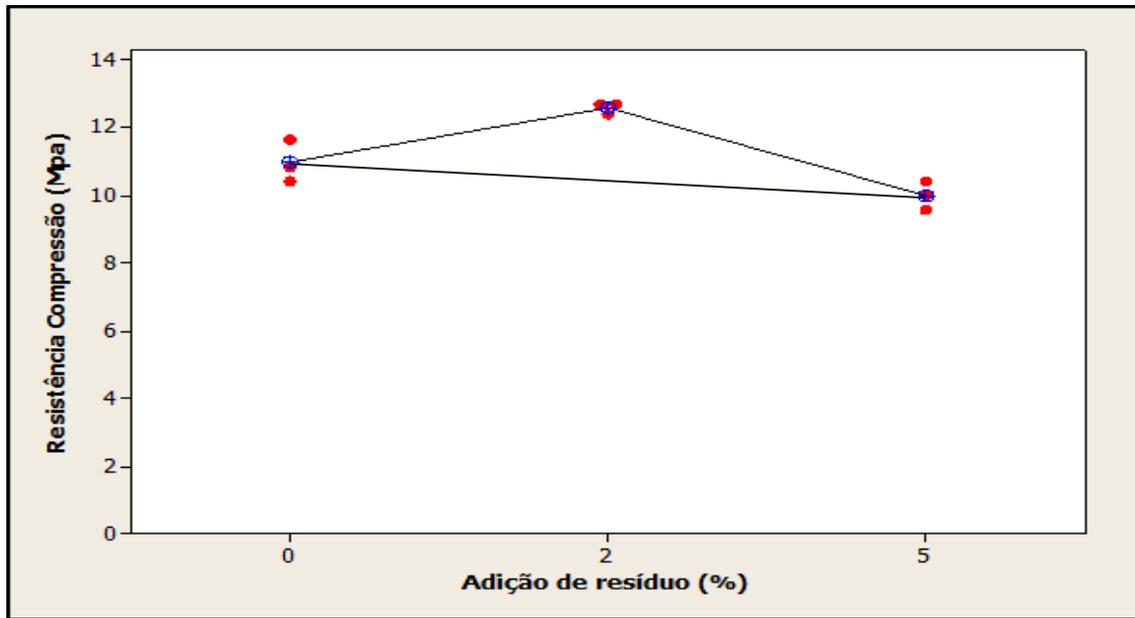
MQ: Média Quadrática

F: Valor F calculado

P: Valor P (probabilidade de que a diferença observada seja fruto do acaso)

A Figura 12 apresenta um gráfico com os resultados extraídos da análise de variância, relacionando a resistência à compressão simples e a porcentagem de adição do resíduo eletroeletrônico.

Figura 12 – Comportamento da resistência à compressão simples em relação a porcentagem de adição das placas de circuito impresso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise da Tabela 7 e da Figura 12, verifica-se que a probabilidade de que a diferença observada seja fruto do acaso é muito baixa, devido ao valor de P ser $< 0,001$. Nota-se que há, pelo menos, uma diferença significativa observada (hipótese alternativa) e pode-se afirmar isso com mais de 95% de confiança.

A diferença ocorre entre os corpos de prova sem substituição e com 2% de substituição, representando um aumento na resistência, e entre as substituições de 2% e 5%, representando uma redução na resistência. Não há diferença entre os corpos de prova sem substituição e com 5% de substituição. Ou seja, a substituição de 2% provoca um sensível aumento na resistência, já entre 2 e 5% percebe-se uma redução significativa observada na resistência, a qual ainda assim não compromete o valor de resistência do concreto, pois não há diferença significativa observada entre corpos de prova sem substituição e com 5% de substituição do agregado miúdo pela placa de circuito impresso.

Tal afirmação pode ser visualizada também na Figura 12, pelo comportamento dos dados.

4.6 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES DURANTE ENSAIO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Tabela 8 apresenta os resultados de deformação vertical no momento da ruptura dos corpos de prova, assim como a média para cada porcentagem de substituição, o desvio padrão, o coeficiente de variação e a variância. Todos os corpos de prova estavam com 28 dias no momento do teste.

Tabela 8 – Resultados da deformação vertical no momento da ruptura dos corpos de prova.

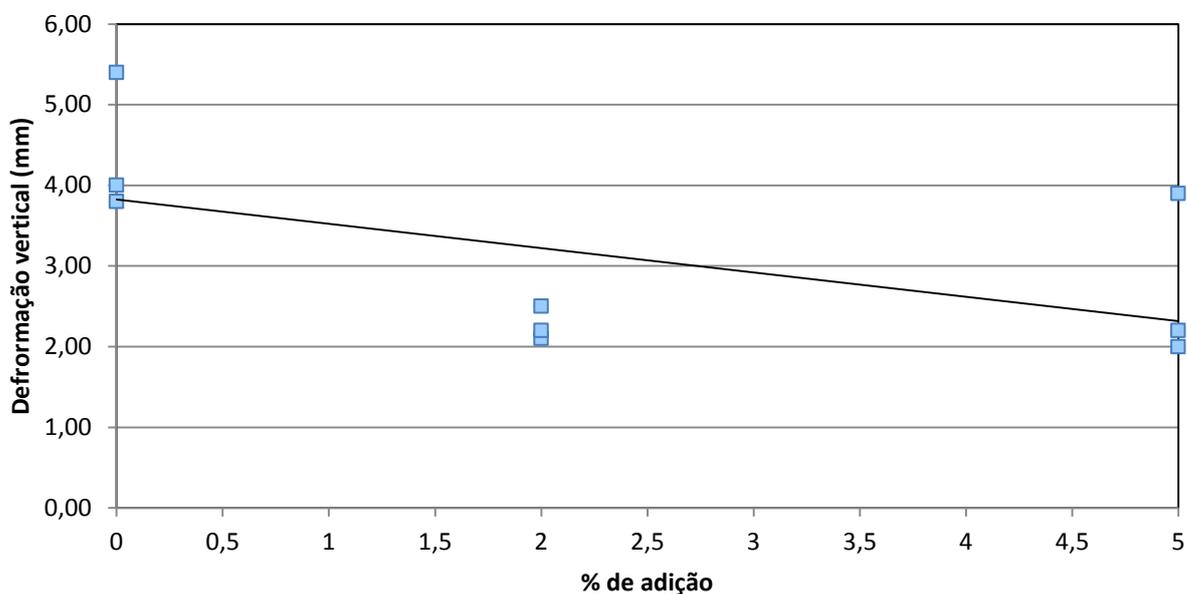
Corpo de Prova	% de substituição de placas de circuito impresso	Diâmetro (mm)	Força Máxima (kN)	Deformação vertical (mm)	Média para cada % de substituição	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)	Variância
CP 1	0	50	21,3	3,80	4,40	0,87	19,81	0,7569
CP 2	0	50	22,9	4,00				
CP 3	0	50	20,5	5,40				
CP 4	2	50	24,4	2,50	2,27	0,21	9,184	0,0441
CP 5	2	50	24,9	2,10				
CP 6	2	50	24,9	2,20				
CP 7	5	50	19,6	2,00	2,70	1,04	38,668	1,0816
CP 8	5	50	18,8	2,20				
CP 9	5	50	20,5	3,90				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Os corpos de prova sem a substituição do resíduo eletroeletrônico apresentaram uma deformação vertical média durante o ensaio de compressão simples de 4,40 mm. Já os corpos de prova com substituição de 2% apresentaram uma deformação vertical média durante o ensaio de compressão simples de 2,27 mm. Os corpos de prova com substituição de 5% apresentaram uma deformação vertical média durante o ensaio de compressão simples de 2,70 mm.

A Figura 13 expõe, em forma de gráfico, a deformação vertical em relação às diferentes porcentagens de adição de resíduo eletroeletrônico.

Figura 13 – Gráfico representando a deformação vertical de acordo com a porcentagem de adição do resíduo eletroeletrônico.



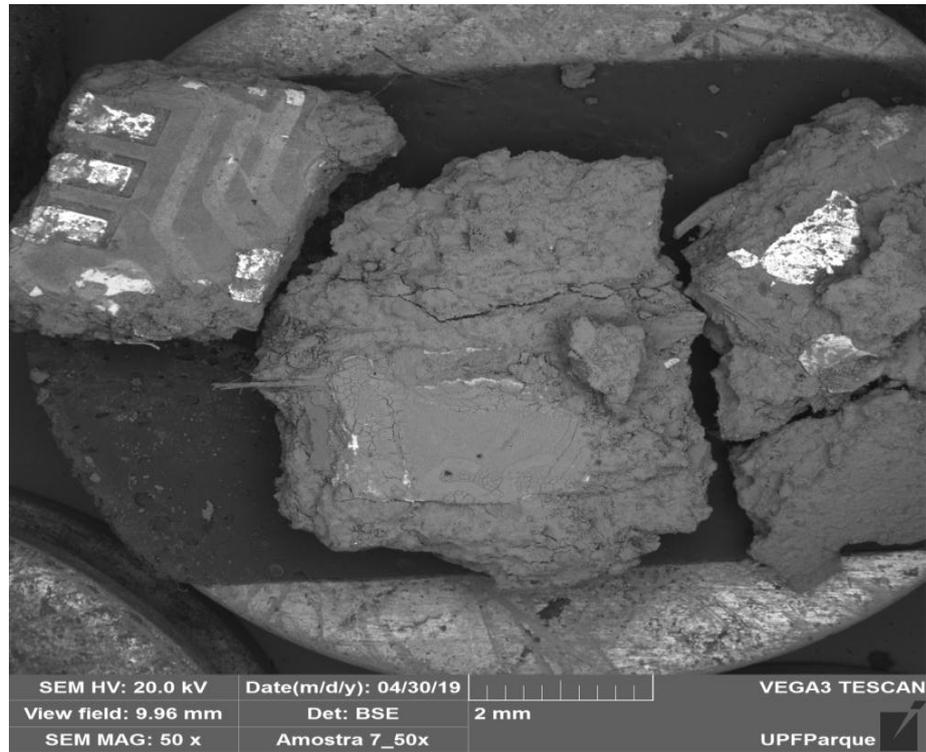
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Através das análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível observar a microestrutura dos fragmentos dos corpos de prova, com 2% de substituição, após o rompimento.

A partir do microscópio, a Figura 14 ilustra as aproximações de (a) 50x, (b) 200x, (c) 500x e (d) 2000x.

Figura 14 – Microscopias das amostras analisadas.

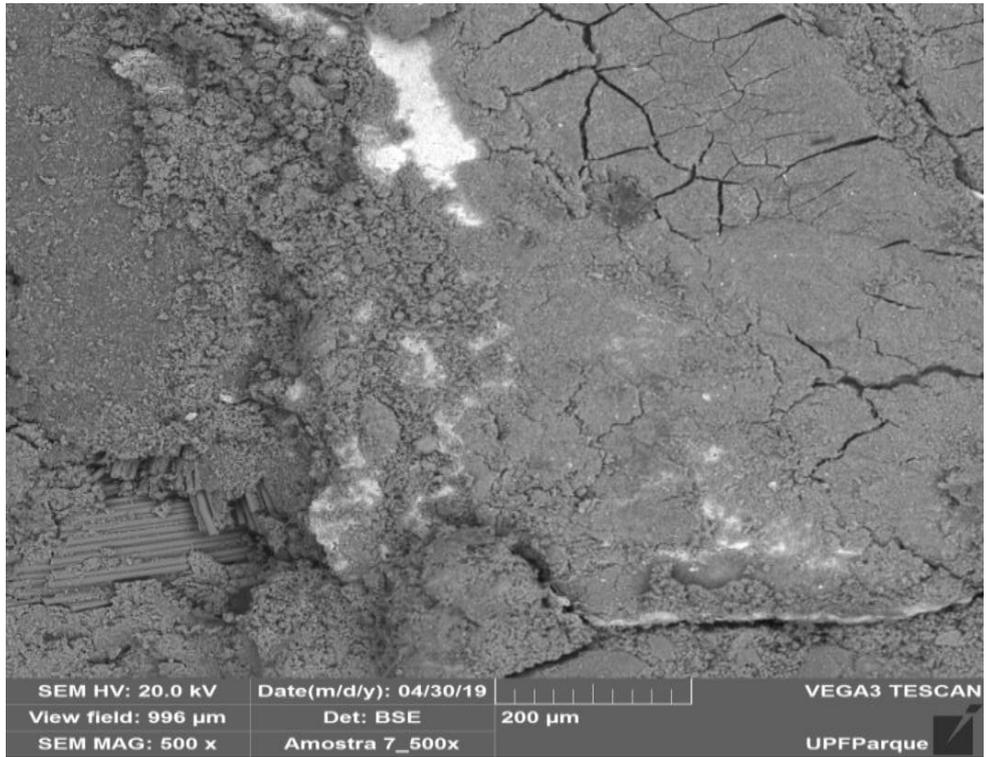


(a) 50x

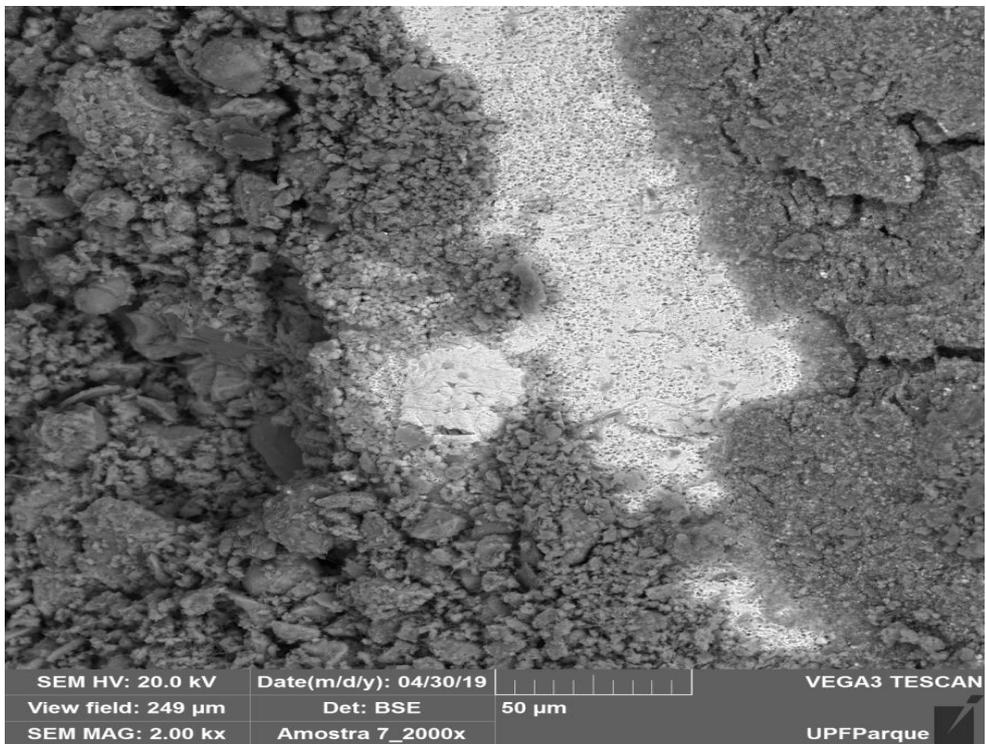


(b) 200x

Figura 14 – Microscopias das amostras analisadas.



(c) 500x



(d) 2000x

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a Figura 14 (a) 50x e (b) 200x, pode-se perceber pelas micrografias que a interação entre a placa de circuito impresso com os componentes do concreto apresenta característica não uniforme, não sendo distribuída de forma homogênea e com baixa interação com a estrutura do concreto, não havendo uma ligação completa com a microestrutura.

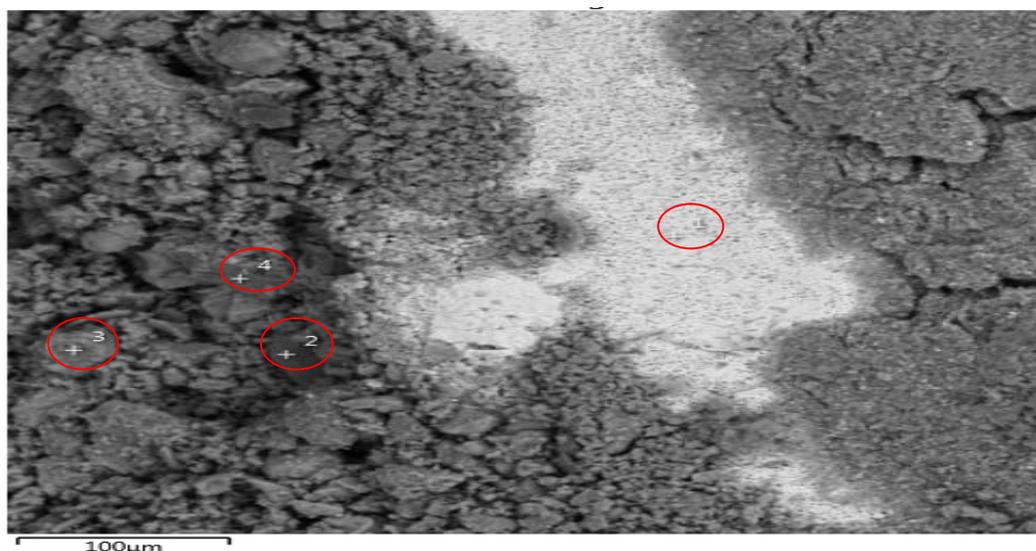
Já na Figura 14 (c) 500x e (d) 2000x, é possível observar que onde há o contato do concreto com a placa de circuito impresso a interação é superficial, também não havendo uma reação para tal contato. Há de se considerar a possibilidade de que a placa de circuito impresso libere metais pesados para a estrutura sólida, demonstrando uma coloração branca, a qual é um indicativo, nesta técnica, de presença de elementos com alto peso atômico.

Caso ocorra a substituição da placa de circuito impresso com uma granulometria menor, talvez haveria a possibilidade de uma maior interação com a microestrutura, podendo oferecer um suporte ainda maior para a formação do concreto, de modo semelhante como ocorreria com as partículas de agregado miúdo sem substituição.

No que tange à análise microscópica realizada, é possível afirmar também que a substituição do agregado miúdo pela placa de circuito impresso, apesar dos resultados mecânicos indicarem o contrário, não apresenta aspectos que agregariam resistência ao concreto.

A Figura 15 ilustra as análises semi-quantitativas da composição química em 4 pontos (*spectrum*) relacionadas na análise de EDS, ferramenta acoplada ao MEV, que utiliza raios X característicos.

Figura 15 – Análise semi-quantitativa da composição com 2% de substituição, para 4 pontos específicos analisados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 9 mostra a composição química elementar dos pontos específicos analisados (destacados em vermelho) pelo MEV e apresentados na Figura 15.

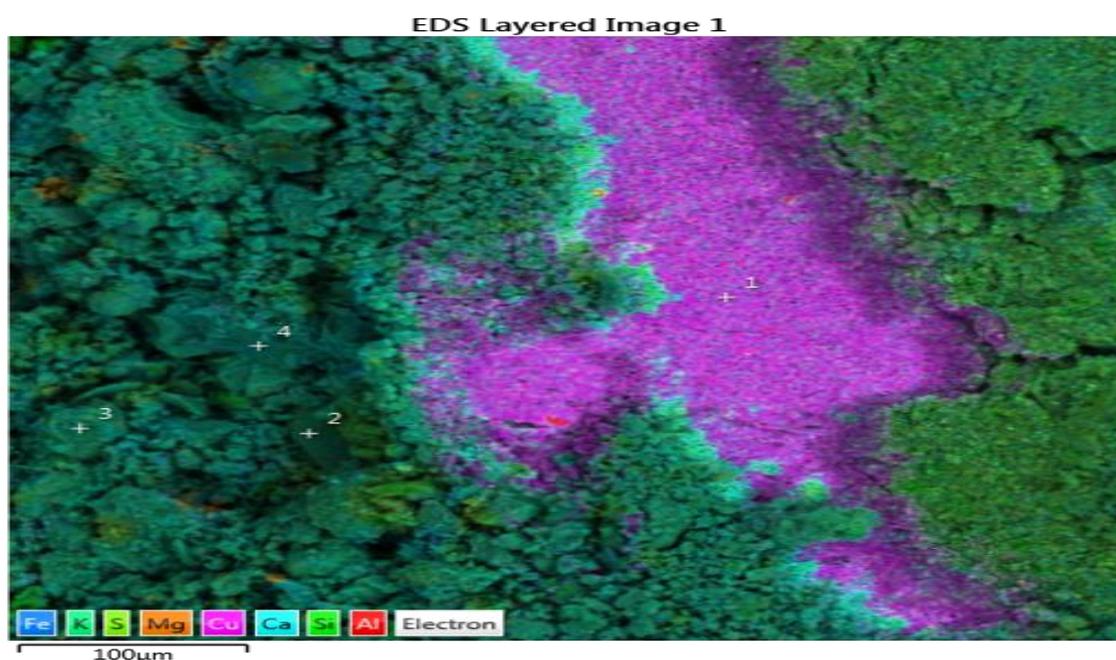
Tabela 9 – Composição do concreto para as misturas de 2% de resíduo eletroeletrônico.

Pontos	Cu (Cobre)	Al (Alumínio)	Ca (Cálcio)	Si (Silício)	Mg (Magnésio)	Fe (Ferro)	S (Enxofre)
1	98,7	-	0,7	0,5	-	-	-
2	3,8	3,6	71,3	16,5	1,7	1,8	1,2
3	2,1	2,0	76,9	17,3	1,7	-	-
4	4,3	2,3	83,5	6,8	0,9	1,1	1,1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Relacionando a Figura 15 e os resultados da tabela 9, verifica-se que nos pontos 2, 3 e 4 existe maior presença de cálcio sob a face de coloração mais escura. Já para o ponto específico 1, observa-se uma menor concentração de cálcio e silício, e uma alta concentração de cobre sob a face de coloração branca da microscopia, o que ratifica a afirmação de haver a liberação de metais pesados na amostra analisada.

Figura 16 – Mapa químico com os 4 pontos específicos analisados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 16, mostra-se em detalhes a micrografia apresentada na Figura 15, com seu respectivo mapa químico, confirmando mais uma vez, a informação de concentração de metais como cálcio e cobre. É possível perceber isso, pela coloração do cobre (Cu) e do cálcio (Ca), indicado na legenda do canto inferior esquerdo da Figura 16.

5 CONCLUSÕES

Pode-se afirmar que todos os procedimentos e experimentos feitos durante o estudo foram realizados de forma adequada e respeitando as respectivas normas.

Os corpos de prova sem substituição do resíduo eletroeletrônico e os corpos de prova com substituição de 2% e de 5% de resíduo, durante o rompimento, apresentaram a forma de ruptura colunar (e), de acordo com o esboço extraído da ABNT - NBR 5.739, na Figura 8.

Nos ensaios de resistência à compressão simples e deformação, os valores médios de resistência e deformação, respectivamente, foram os seguintes:

- a) sem substituição: 10,98 MPa; 4,40 mm;
- b) substituição de 2%: 12,59 MPa; 2,27 mm;
- c) substituição de 5%: 10,01 MPa; 2,70 mm.

De acordo com a análise estatística realizada para resistência à compressão simples, a probabilidade de que a diferença observada entre corpos de prova com diferentes porcentagens de substituição do agregado miúdo seja devido ao acaso é muito baixa. Existe diferença observada entre os valores sem substituição e com 2% de substituição de placa de circuito impresso, apontando para um aumento na resistência. Pode-se afirmar que não há diferença significativa entre os valores sem substituição e com 5% de substituição, o que pode confirmar que não há perda de resistência à compressão simples quando se substitui 5% do agregado miúdo pelo resíduo eletrônico. Se comparados os valores de 2% para 5% de substituição pode-se afirmar que há uma sensível redução na resistência.

Para os resultados de deformação é possível afirmar que ela decresce significativamente dos corpos de prova sem adição para os corpos de prova com adição do resíduo eletroeletrônico. Ao analisar os resultados de deformação dentro do grupo dos corpos de prova com substituição, pode-se perceber um discreto crescimento na deformação dos corpos de prova com 2% de substituição para os corpos de prova com 5% de substituição.

Conforme a análise de microscopia eletrônica de varredura, na Figura 14, pode-se concluir que a interação entre a placa de circuito impresso com os componentes do concreto apresenta não uniformidade, não homogeneidade e baixa interação com a estrutura do concreto, sem ocorrer uma ligação completa com a microestrutura. É possível observar também, que onde há o contato do concreto com a placa de circuito impresso a interação ocorre de forma superficial, sem reação.

Existe a possibilidade de liberação de metais pesados, componentes das placas de circuito impresso, na estrutura sólida do concreto, o que é demonstrado pela análise microscópica semi-quantitativa, na Figura 15 e pela coloração do mapa químico, na Figura 16.

A hipótese de substituição da placa de circuito impresso com uma granulometria menor considera a possibilidade de uma maior interação com a microestrutura do concreto, podendo oferecer um suporte ainda maior para sua formação, se assemelhando com o que ocorreria com corpos de prova sem substituição.

É necessário acentuar que, através de análise estatística, foi constatado um aumento na resistência para 2% de substituição do agregado miúdo e não foi constatada diferença significativa de resistência entre os valores de porcentagens sem substituição e com 5% de substituição, demonstrando a viabilidade mecânica do estudo para ambas as porcentagens.

No entanto, o estudo elaborado por Vogt (2017) e o presente trabalho reforçam que, principalmente, a substituição de 2% do agregado miúdo pelo resíduo eletroeletrônico além de não comprometer a resistência simples à compressão do concreto pode inclusive aumentá-la.

Dessa forma, sugere-se que seja encontrada uma relação entre água e cimento menor que 0,7, para que se avalie se isso não é um fator limitante da resistência à compressão simples e da deformação do concreto. Outra possibilidade é a de encontrar uma porcentagem ótima de substituição do agregado miúdo, podendo esta ser maior que 5% do agregado substituído, visto que a resistência do concreto não foi comprometida com tal porcentagem de substituição. Propõem-se também a realização de testes estatísticos para melhor avaliar a deformação causada durante os testes de rompimento, e de outros tipos de testes mecânicos para o concreto, como o de tração.

Testes alternativos aos de lixiviação e solubilização para avaliação química do material produzido se mostram uma opção interessante para comprovação de uma destinação final ambientalmente adequada para a placa de circuito impresso, pois é possível que ocorra a liberação de metais pesados no concreto, como o cobre, que pôde ser constatado a partir da realização do MEV com EDS. Considerando também, que os testes realizados por Vogt

(2017) se caracterizam por serem feitos em condições extremamente agressivas, podendo não caracterizar de forma precisa o comportamento do lixiviado enquanto o resíduo eletrônico ainda está encapsulado no concreto, tal condição pode diminuir significativamente o potencial de lixiviação (VOGT, 2017).

Outra alternativa para o estudo seria a realização de experimentos com um tipo específico de placa de circuito impresso, como a de celulares apenas, o que restringiria o número de substâncias que poderiam ser encontradas e possibilitaria uma avaliação mais homogênea dos resultados relativos às placas de circuito impresso. Fazendo a caracterização de seus componentes químicos, do mesmo modo para seus aspectos físicos, como por exemplo, o seu peso específico.

Mais uma sugestão pertinente é a possibilidade de um estudo das análises de microscopia eletrônica de varredura das amostras sem substituição do agregado miúdo para avaliação e base comparativa com análises das amostras com substituição do agregado miúdo, para que se possa melhor observar as diferenças microestruturais entre os corpos de prova.

Por fim, também é necessário que seja feita uma avaliação de como se daria o comportamento, em questão ambiental e estrutural, desse tipo de material no decorrer do tempo.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados - Terminologia**, Brasil, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregado para concreto de cimento Portland: especificações**. Brasil, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**, Brasil, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**, Brasil, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**, Brasil, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**, Brasil, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7860: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial**, Brasil, 2015.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 13 out. 2019.
- CRUZ, H. et al. **Quantification of the microconstituents formed during solidification by the Newton thermal analysis 60 method**. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/257344760_Quantification_of_the_microconstituents_formed_during_solidification_by_the_Newton_thermal_analysis_method>. Acesso em: 25 out. 2019.
- DEDAVID, B.A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- DEMAJOROVIC, J.; AUGUSTO, E. E. F.; SOUZA, M. T. S. **Logística reversa de REEE em países em desenvolvimento: Desafios e perspectivas para o modelo brasileiro**. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1414-753X2016000200117&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 14 out. 2019.
- FERNANDEZ, F. A. dos S. **O poema imperfeito: crônicas de Biologia, conservação da natureza, e seus heróis**. 2. ed. Curitiba: UFPR, 2004.
- INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. **Global E-waste Monitor 2017**. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Pages/Global-E-waste-Monitor-2017.aspx>>. Acesso em: 10 out. 2019.

FILHO, J. O. V. **Avaliação da Resistência à Compressão do concreto através de testemunhos extraídos: Contribuição à estimativa do coeficiente de correção devido aos efeitos de broqueamento.** 2007. 1 v. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GONÇALVES, A. T. **O lado obscuro da high tech na era do neoliberalismo: seu impacto no meio ambiente.** 2007. Disponível em: <<http://lixotecnologico.blogspot.com/2007/07/o-lado-obscuro-da-high-tech-na-era-do.html>>. Acesso em: 24 out. 2019.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. **Global E-waste Monitor 2017.** Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Pages/Global-E-waste-Monitor-2017.aspx>>. Acesso em: 10 set. 2019.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretores e elaboração de textos básicos para normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** 1999. 240 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

MATTOS, K. M. C.; MATTOS, K. M. C.; PERALES, W. J. S. Os impactos ambientais causados pelo lixo eletrônico e o uso da logística reversa para minimizar os efeitos causados ao meio ambiente. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STP_077_543_11709.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MINITAB 19. **Suporte ao Minitab 19: O que é ANOVA?.** 2019. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/19/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>>. Acesso em: 26 out. 2019.

MODRO, N. L. R. **Desenvolvimento e Caracterização de Concreto de Cimento Portland Contendo Resíduos Poliméricos de PET.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). UNIVILLE, Joinville, 2008.

MOI, P. C. P. et al. **Lixo eletrônico: Consequências e possíveis soluções.** 2012. Disponível em: <<https://www.periodicos.univag.com.br/index.php/CONNECTIONLINE/article/view/105>>. Acesso em: 17 out. 2019.

NAIA, G. L. **Desenvolvimento de produto sustentável: Aproveitamento de placas de circuito impresso descartadas como agregado na fabricação de blocos de alvenaria para a construção civil.** 2014. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.

NATUME, R. Y.; SANT'ANNA, F.S. P. Resíduos Eletroeletrônicos: Um Desafio Para o Desenvolvimento Sustentável e a Nova Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos. In: International Workshop Advances in Cleaner Production, 3., 2011, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.advancesincleanerproduction.net/third/files/sessoes/5b/6/natume_ry%20-%20paper%20-%205b6.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2019.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

RODRIGUES, A. C. **Impactos socioambientais dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos: estudo da cadeia pós-consumo no Brasil**. 2007. 321 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara D'Oeste, 2007. Disponível em: <<https://www.unimep.br/phpg/bibdig/pdfs/2006/ERXOTYXCTFMV.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

SANTOS, C. A. F.; NASCIMENTO, L. F. M.; NEUTZLING, D. M. **A Gestão dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) e as Consequências para a Sustentabilidade: As Práticas de Descarte dos Usuários Organizacionais**. 2014. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/106618>>. Acesso em: 13 out. 2019.

SANTOS, F. H. S.; SOUZA, C. E. G. **Resíduos de origem eletrônica**. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Disponível em: < <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/313/1/sta-57.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2019.

SCHLUEP, M. et al. **Recycling – From E-waste to resources**. 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/278849195_Recycling_-_from_e-waste_to_resources>. Acesso em: 13 out. 2019.

SHAMIN, A.; MURSHEDA, A. K.; RAFIQ, I. E-Waste Trading Impact on Public Health and Ecosystem Services in Developing Countries. **International Journal of Waste Resources**. 2015. Disponível em: < <https://www.longdom.org/open-access/ewaste-trading-impact-on-public-health-and-ecosystem-services-indeveloping-countries-2252-5211-1000188.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2019.

TEIXEIRA F. S.; SALVADORI M. C.; BRITO J. R. **Microscópio eletrônico de varredura como ferramenta para micro e nanotecnologia**. Universo Elétrico (Electric Universe) Focado em Elétrica, Eletrônica, Telecomunicações e Automação Industrial. 2011.

VEIT, H. M. **Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

VOGT, W. A. **Reciclagem de resíduos sólidos eletrônicos como agregado na fabricação de concreto para a construção civil, visando a redução de impactos ambientais**. 2017. Disponível em: <<https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/1692/1/VOGT.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2019.