



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

WALISSON ANDRÉ VOGT

**RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS ELETRÔNICOS COMO AGREGADO NA
FABRICAÇÃO DE CONCRETO PARA A CONSTRUÇÃO CIVÍL, VISANDO A
REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS**

ERECHIM, 2017.

WÁLISSEON ANDRÉ VOGT

RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS ELETRÔNICOS COMO AGREGADO NA
FABRICAÇÃO DE CONCRETO PARA A CONSTRUÇÃO CIVÍL, VISANDO A
REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS,
como requisito da disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso II, sob orientação do Profº Dr
Pedro Eugênio Gomes Boehl.

ERECHIM, 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser sempre a base para todos os momentos da vida.

À minha mãe, Serli Vogt e ao meu pai, Flávio Vogt, além de meus irmãos, Hidianara Vogt e Wanderson Vogt, por sempre estarem ao meu lado e me apoiando de todas as formas, aconselhando e incentivando.

Agradeço a todos os meus amigos que de forma ou outra me acompanharam durante toda a graduação e foram importantes para chegar nesta etapa.

Ao meu orientador, professor Pedro Eugênio Gomes Boehl, e também ao professor Eduardo Pavan Korf, por todo o conhecimento repassado, todas as dicas, ajuda fornecida e principalmente pela atenção dedicada, para que os resultados dessa pesquisa pudessem ser obtidos com sucesso.

Deixo meu agradecimento também aos técnicos e colegas do Laboratório de Efluentes e Resíduos, por toda a assistência e prestatividade, e a todos os professores que me transmitiram seus conhecimentos durante toda a graduação.

Por fim, fica aqui minha gratidão a todos que se fizeram presentes na minha caminhada até aqui.

RESUMO

Os resíduos sólidos eletrônicos, comumente descartados erroneamente no lixo comum possuem metais em sua composição, significando um elevado grau de contaminação da água e do solo, além de apresentar riscos à saúde humana. Este trabalho visou a substituição da porção de agregados miúdos ou graúdos por resíduos sólidos eletrônicos no concreto. Foram realizados ensaios de natureza mecânica, onde foram comparados valores de resistência para o concreto convencional (puro) e para amostras com resíduo eletrônico como agregado, assim como, análises de natureza ambiental, onde foi avaliado o potencial de redução da contaminação ambiental, após o encapsulamento, com testes de lixiviação e solubilização de metais pesados. Para composição das amostras, utilizou-se quantidades de 2 e 5% de substituição do agregado convencional pelo material reciclado e os ensaios de compressão simples, foram realizados para resistência de 28 dias, apresentando os seguintes valores: Concreto puro – 4,27MPa; Substituição de 2% da areia – 5,26MPa; 5% da areia – 3,51MPa; 2% da brita – 4,44MPa e 5% da brita – 3,92MPa. Nota-se que, para a substituição de 2% de resíduo para ambos os agregados, houve melhora na resistência, o que não ocorreu para a substituição em 5% do agregado, comprovando mecanicamente que incorporar o E-lixo na matriz cimentícia pode ser uma boa alternativa para destinação do mesmo. No que tange a análise ambiental, a partir do ensaio de lixiviação, os elementos Al, Cu, Fe, Mn e Zn não puderam ser avaliados, considerando que a norma NBR 10004/04, não apresenta valores limites para tais concentrações. Já para os elementos Ag, Ba e Cr, suas respectivas concentrações se apresentaram em valores inferiores aos limites definidos. Por sua vez, os elementos As, Mn, Pb, se apresentaram com concentrações maiores que o limite permitido, caracterizando um material tóxico, sendo normativamente um resíduo perigoso Classe I. Em análise, observa-se que, nas amostras onde o resíduo eletrônico foi diluído, foram apresentadas concentrações consideravelmente menores que na amostra de resíduo eletrônico bruto, apresentando potencial redução dos contaminantes tóxicos, comprovando assim a eficácia de sua incorporação no concreto para uso na construção civil.

Palavras Chave: *Blocos de concreto, resíduo eletrônico, redução de impactos, lixiviação.*

ABSTRACT

Electronic solid waste, commonly erroneously discarded in ordinary waste, has metals in its composition, meaning a high degree of contamination of water and soil, as well as presenting risks to human health. This work aimed at replacing the portion of small or large aggregates with solid electronic residues in the concrete. Mechanical tests were carried out, comparing resistance values for conventional (pure) concrete and for samples with electronic waste as an aggregate, as well as environmental analyzes, where the potential for reducing environmental contamination was evaluated after encapsulation, with leaching tests and solubilization of heavy metals. For sample composition, the recycled material replaced 2 and 5% of the conventional aggregate and the simple compression tests were performed for 28 days of resistance, with the following values: Pure concrete - 4.27MPa; Replacement of 2% sand - 5.26MPa; 5% of the sand - 3.51MPa; 2% of the gravel - 4.44MPa and 5% of the gravel - 3.92MPa. It was observed that, for the substitution of 2% of residue for both aggregates, there was an improvement in the resistance, which did not occur for the substitution in 5% of the aggregate, proving mechanically that incorporating the E-trash in the cementitious matrix can be a good alternative for the destination of the same. Regarding the environmental analysis, from the leaching test, the elements Al, Cu, Fe, Mn and Zn could not be evaluated, considering that the norm NBR 10004/04, does not present limit values for such concentrations. As for the Ag, Ba and Cr elements, their respective concentrations were below the defined limits. On the other hand, the elements As, Mn, Pb, presented with concentrations greater than the allowed limit, characterizing a toxic material, being normatively a hazardous waste Class I. In the analysis, it is observed that, in the samples where the electronic waste was considerably lower concentrations were found than in the raw electronic waste sample, presenting potential reduction of toxic contaminants, thus proving the effectiveness of its incorporation in the concrete for use in civil construction.

Key Words: *Cement blocks, E-Waste, impact reduction, leaching.*

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Fluxograma representativo da metodologia aplicada para a execução da pesquisa. 11
- Figura 2:** Resíduo eletrônico classificado após execução da análise granulométrica. 14
- Figura 3:** Incorporação do resíduo eletrônico com os agregados na mistura de concreto. Ao fundo, os moldes com o concreto já pronto e armazenado. 16
- Figura 4:** Retificador de corpos-de-prova do Laboratório de Construções da URI, utilizado no ensaio, para padronização das amostras. 17
- Figura 5:** Prensa Hidráulica com potência de até 2000kN, utilizada para ruptura dos corpos-de-prova. 17
- Figura 6:** Execução do ensaio de resistência à compressão simples, realizado no Laboratório de Construções da URI – Campus II – Erechim. 17
- Figura 7:** Filtração ocorrendo com auxílio da bomba de filtração à vácuo, para obtenção de extrato lixiviado. 19
- Figura 8:** Amostras de ensaio de solubilização em repouso em água deionizada por 7 dias, para posterior filtração e análise. 20
- Figura 9:** Configuração da ruptura decorrente da análise de resistência à compressão simples. 23
- Figura 10:** Esboços dos tipos de rupturas características para os procedimentos de análise de resistência à compressão simples. 23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição de resíduo eletrônico incorporada em cada amostra do experimento.....	15
Tabela 2: Configuração das amostras preparadas para execução do ensaio de lixiviação para resíduos sólidos.	19
Tabela 3: Análise granulométrica feita na brita disponibilizada, para posterior classificação e caracterização.	21
Tabela 4: Quantidade de agregado grosseiro a ser substituído pelo resíduo eletrônico na fabricação dos blocos.....	21
Tabela 5: Análise granulométrica feita na areia disponibilizada, para posterior classificação e caracterização.	21
Tabela 6: Quantidade de agregado fino a ser substituído pelo resíduo eletrônico na fabricação dos blocos.	22
Tabela 7: Caracterização granulométrica dos Resíduos Eletrônicos.....	22
Tabela 8: Resultados da análise de resistência à compressão, em MPa.....	24
Tabela 9: Resultado da análise de extrato de lixiviado para classificação do resíduo.	25
Tabela 10: Resultado da análise de extrato solubilizado para classificação do resíduo.....	26

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. METODOLOGIA.....	11
2.1 Materiais Utilizados.....	12
2.1.1 Brita.....	12
2.1.2 Areia.....	12
2.1.3 Resíduos Eletrônicos.....	13
2.1.4 Cimento.....	14
2.2 Procedimento Experimental.....	14
2.2.1 Fabricação dos Blocos de Concreto.....	14
2.2.2 Análise de Resistência à Compressão Simples.....	16
2.2.3 Classificação dos blocos de concreto e resíduo, com relação à periculosidade.....	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
3.1 Caracterização da brita.....	20
3.2 Caracterização da areia.....	21
3.3 Caracterização do resíduo eletrônico.....	22
3.4 Análise de resistência à compressão simples.....	23
3.5 Análise de extrato lixiviado.....	24
3.6 Análise de extrato solubilizado.....	25
4. CONCLUSÃO.....	26
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28

1. INTRODUÇÃO

Não é novidade que o investimento em equipamentos eletroeletrônicos aumenta a cada dia, sempre buscando melhorar a qualidade, funcionalidade e a praticidade dos produtos. Na mesma proporção em que se dá este crescimento, ocorre o descarte por produtos já obsoletos ou com defeitos, também nomeados como “E-lixo”. De acordo com dados da Organização das Nações Unidas (ONU), em 2014, o Brasil é o país emergente que mais gera resíduos sólidos eletrônicos no mundo, sendo cerca de 1,4 milhões de toneladas, em que 4% destes resíduos tem a reciclagem como destinação final.

A partir do cenário que passa a se instalar em nível mundial, no Brasil, houve em 2010 a criação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, através da Lei Nº 12.305, a qual surge como alternativa para redução do descarte irregular de resíduo eletrônico. Pela lei ficou estabelecida a implantação da logística reversa, definida como “instrumento de desenvolvimento econômico e social” [...] para “viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010).

Após a implantação da Lei Nº 12.305 (BRASIL, 2010), algumas poucas empresas especializadas na reciclagem de E-lixo surgiram e outras, das grandes empresas do mercado eletroeletrônico, passaram a adotar o sistema de logística reversa, onde as empresas geradoras dos resíduos trabalham para fornecer soluções de reciclagem para seus produtos, após o fim de sua vida útil, em diferentes estágios de tratamento (ONU, 2015).

De acordo com a Lei 12305 (BRASIL, 2010), resíduos eletrônicos podem ser classificados como perigosos por metais como chumbo, mercúrio, cádmio, berílio, entre outros.

Através do descarte inadequado de resíduo eletrônico gera liberação de substâncias tóxicas, que podem causar grandes impactos ao meio ambiente. Destinados incorretamente no lixo comum as substâncias químicas presentes no E-lixo penetram no solo e também nos lençóis freáticos, contaminando todo um sistema e se tornando até uma ameaça à saúde humana (SILVA, 2010).

Diante do exposto, fica evidente a necessidade de formas alternativas para reciclagem/reutilização destes materiais. Pensando nisto, este trabalho analisa a viabilidade de utilização de E-lixo previamente triturado e incorporado como substituinte de agregados na fabricação do concreto, utilizados na indústria da construção civil, possibilitando a redução da quantidade de resíduos eletrônicos a serem erroneamente dispostos.

Segundo Franco (2011), a utilização de E-lixo na fabricação do concreto “anula a possibilidade de contaminação ambiental pelos resíduos, além de que a diluição dos resíduos no compósito de matriz cimentícia resulta no encapsulamento deste particulado, criando uma barreira”, pois evita a contaminação ambiental provocada pela lixiviação de contaminantes a partir do contato com as águas da chuva, melhora a qualidade de vida e traz benefícios econômicos, devido à redução das quantidades de matéria-prima utilizadas na fabricação do concreto.

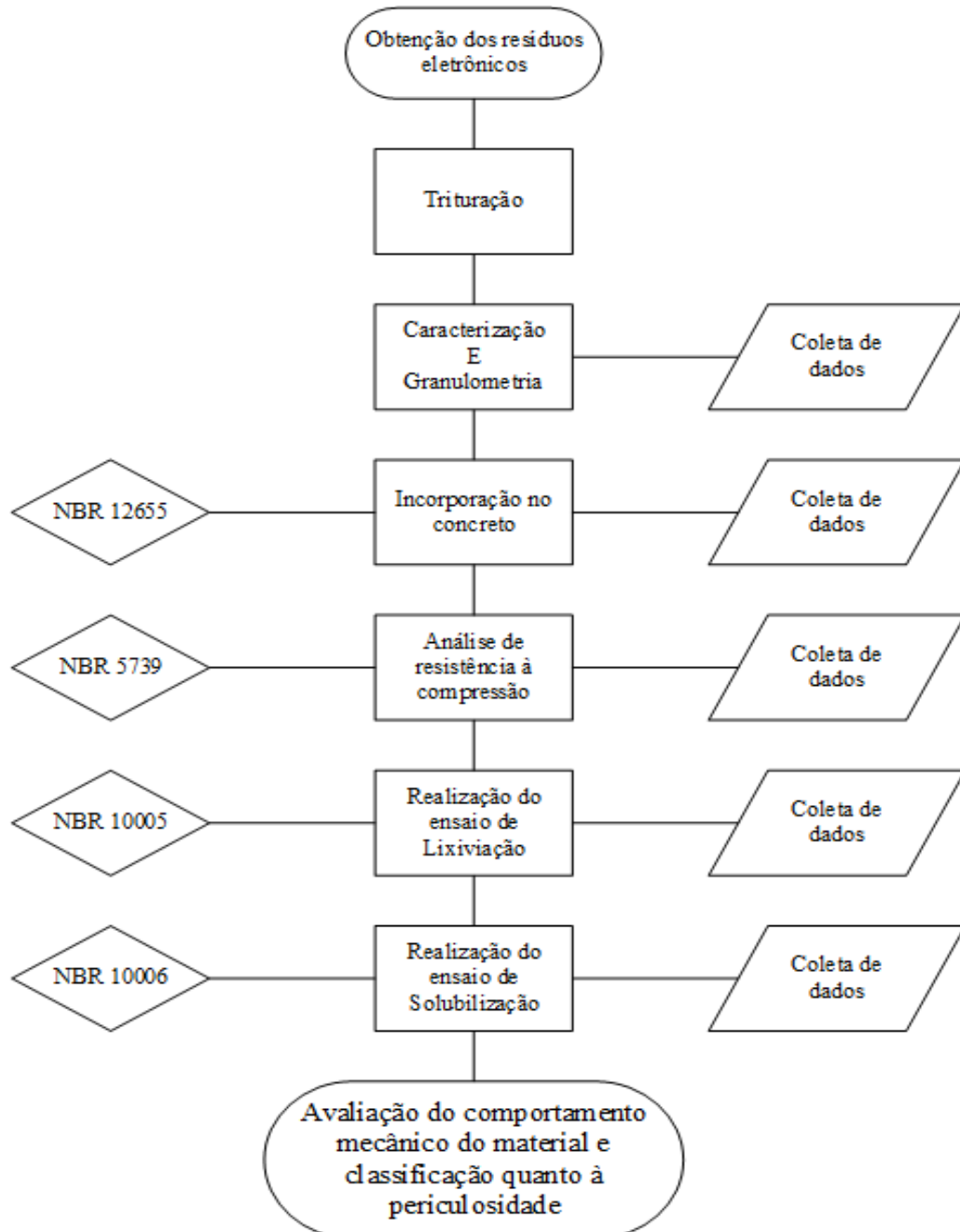
Na literatura existem poucos estudos que adotaram a metodologia de aplicar o resíduo sólido eletrônico no concreto. Mais especificamente, encontrou-se apenas o estudo de Naia (2014) que avaliou a influência dos resíduos de placas de circuito impresso agregados na matriz cimentícia de blocos de vedação. Somando-se ao fato de praticamente não existir estudos, não se encontrou na literatura, nenhum estudo que esteve voltado para a área ambiental, com análises diretas sobre o potencial de periculosidade e lixiviação de contaminantes.

Neste sentido, este trabalho objetiva aplicar resíduo sólido eletroeletrônico na matriz cimentícia como substituinte de parte do material agregado na fabricação do concreto, avaliar o seu comportamento mecânico e classificar o mesmo, de acordo com a sua possível periculosidade, buscando dar uma forma alternativa para estes resíduos, reduzindo os riscos de contaminação e impactos ambientais causados pela disposição irregular.

2. METODOLOGIA

O caminho seguido para chegar aos objetivos deste trabalho iniciou-se ainda na obtenção da matéria prima, passando por toda sua caracterização, manipulação e análises, como pode ser observado na Figura 1, abaixo, representada pelo fluxograma.

Figura 1: Fluxograma representativo da metodologia aplicada para a execução da pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

2.1 Materiais Utilizados

2.1.1 Brita

A brita utilizada é oriunda da região norte do estado. De acordo com o Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, a brita é oriunda da era Mesozoico, no período Cretáceo, sendo uma rocha “que possui formação Serra Geral – derrames de basaltos, basalto andesitos, riolitos e riolito, de filiação toleítica, onde intercalam-se arenitos intertrápicos Botucatu na base e litarenitos e sedimentos vulcanogênicos da porção mediana ao topo da sequência.” (CRPM, 2006). Mais especificamente, trata-se da Fácies Paranapanema (K1 β pr), composta por “derrames basálticos granulares finos, melanocráticos, contendo horizontes vesiculares espessos preenchidos por quartzo, zeolitas, carbonatos, seladonita, cobre nativo e barita” (CRPM, 2006).

Antes de ser empregada na fabricação, a brita (nº 2) passou por uma análise granulométrica, sendo esta apresentada na Tabela 2, disponível nos resultados.

Posteriormente à análise granulométrica, foi encontrado o peso específico (δ) da brita, para que a substituição do agregado pelos resíduos eletrônicos pudessem ser feito de acordo com o peso específico dos respectivos materiais. O peso específico da brita foi determinado através da Equação 1:

$$\delta = \frac{\text{Peso total}}{\Delta V} \quad \text{Equação 1;}$$

Em que: δ : peso específico [g/cm³];

Peso total: peso total de brita na pesagem.

ΔV : diferença do volume de água no béquer.

2.1.2 Areia

A areia disponibilizada para a fabricação nos blocos é oriunda de uma das jazidas do Rio Jacuí – RS, com origem da era Cenozoica, no período Neógeno, na época do Holoceno, são depósitos relacionados à barreiras-holocênicas. A Areia de Depósitos Aluviais (Q4A), que, conforme consta no Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, consiste em uma “areia grossa a fina, cascalho e sedimento siltico-argiloso, em calhas de rio e planícies de inundação.” (CRPM, 2006).

Antes de aplicar a areia na fabricação do cimento, foi efetuada uma análise granulométrica, para caracterização do material e, posteriormente, foi determinado o peso específico da areia, para poder substituir o material agregado proporcionalmente pelo resíduo eletrônico. Conforme consta na NBR 093 (ABNT, 2004), o peso específico da areia foi calculado a partir da Equação 2.

$$Dt = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad \text{Equação 2}$$

Em que: P1: Peso do picnômetro vazio = 167,03
 P2: Peso do picnômetro + amostra de areia = 286,68
 P3: Peso do picnômetro + amostra de areia + água = 726,60
 P4: Peso do picnômetro + água = 652,18

2.1.3 Resíduos Eletrônicos

Os resíduos eletrônicos, compostos predominantemente por metais (40%), polímeros (30%) e cerâmicos (30%), segundo He et al. (2006), foram obtidos através de coleta em locais de descarte e também adquirido por doações.

Os resíduos eletrônicos possuem uma fração metálica (FM) e uma fração não metálica (FNM), como complementa:

“A FNM é composta por materiais cerâmicos e plásticos. Os plásticos compostos nas PCI são basicamente retardantes de chama, polímeros halogenados, resinas e fibra de vidro. Os materiais cerâmicos presentes são basicamente sílica e alumina. A FM é composta por metais de base de cobre, ferro, alumínio e estanho; metais raros como tântalo, gálio e metais do grupo da platina (Platina, Paládio, Rádio, Ródio); metais nobres como ouro, prata e paládio e metais perigosos como cromo, chumbo, berílio, mercúrio, cádmio, zinco e níquel.” (GUO *et al.*, 2009).

Para poder ser incorporado no concreto, os resíduos eletrônicos foram triturados manualmente no Laboratório de Construções e Materiais da UFFS e posteriormente, foram submetidos à uma análise granulométrica e determinado seu peso específico, procedimentos efetuados de acordo com as normas DNER-ME 093/04 e NBR 7211, respectivamente.

Na Figura 1, é possível observar os resíduos eletrônicos separados por granulometria, pós-trituração.

Figura 2: Resíduo eletrônico classificado após execução da análise granulométrica.



Fonte: Autoria própria.

2.1.4 Cimento

O cimento utilizado para a fabricação dos blocos de concreto foi o Cimento Portland, produto classificado como ideal para concreto convencional, com secagem rápida e alta resistência.

Como define:

“O cimento Portland é um material pulverulento constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Esses silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica.” (Petrucci, 1980).

2.2 Procedimento Experimental

2.2.1 Fabricação dos Blocos de Concreto

A fabricação dos blocos ocorreu nas dependências da UFFS, onde estavam disponíveis todos equipamentos necessários, junto com a matéria prima necessária.

Devido à análise granulométrica dos resíduos eletrônicos ter apresentado uma

granulometria intermediária entre areia e brita, buscando obter uma margem maior de resultados e encontrar a aplicação mais eficiente, a substituição ocorreu separadamente para os dois agregados, como pode ser observado na Tabela 1, sendo o "Peso Resíduo" a quantidade de resíduo adicionada em sua respectiva amostra. O volume padrão para todas as amostras foi de 0,0078 m³

Tabela 1: Composição de resíduo eletrônico incorporada em cada amostra do experimento.

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

Estando disponíveis todos os materiais e equipamentos necessários e definidas as quantidades de resíduos substituintes dos agregados (areia ou brita) foi dado início à fabricação do concreto, sendo adotado o traço 1:3:3 (cimento, areia e brita), por se tratar do traço mais convencional. A relação água-cimento utilizada na mistura foi correspondente à 0,75 vezes o peso de cimento utilizado, chegou-se à esse valor, adicionando água gradativamente, até que a massa de cimento estivesse no ponto ideal.

Conforme a mistura apresentava estar pronta, foram imediatamente preenchidos os moldes (como pode ser observado na Figura 2), onde ficaram em repouso durante 7 dias. Posteriormente, os corpos de prova foram retirados do molde e armazenados submersos por mais 21 dias, completando assim os 28 dias de cura previstos pela ABNT NBR 12655/06.

Figura 3: Incorporação do resíduo eletrônico com os agregados na mistura de concreto. Ao fundo, os moldes com o concreto já pronto e armazenado.



Fonte: Autoria própria.

2.2.2 Análise de Resistência à Compressão Simples

O ensaio de compressão simples trata-se da aplicação de uma carga vertical sobre um corpo-de-prova geralmente cilíndrico, cuja a carga é gradativamente elevada até rompimento do corpo-de-prova. As deformações horizontais e verticais podem ser medidas durante o ensaio. A distribuição desta carga pela área submetida aos esforços é denominada tensão. No instante da ruptura, esta tensão denomina-se “tensão de ruptura”. (PETRUCCI, 1980).

Seguindo a norma ABNT NBR 5739 (ABNT, 2007), que “*prescreve um método de ensaio pelo qual devem ser ensaiados à compressão os corpos-de-prova cilíndricos de concreto, moldados conforme a ABNT NBR 5738 e extraídos conforme a ABNT NBR 7680*”, os corpos-de-prova fabricados foram encaminhados - quando concluídos os 28 dias de cura - para o Laboratório de Construções da Universidade Regional Integrada – URI, *Campus II – Erechim*, local onde foram executados os procedimentos.

Todos os corpos de prova passaram por uma retificação, através de um retificador de corpos de prova (Figura 3), com a intenção de padronizar as superfícies, tornando-as paralelas, lisas e íntegras, possibilitando resultados mais precisos.

Figura 4: Retificador de corpos-de-prova do Laboratório de Construções da URI, utilizado no ensaio, para padronização das amostras.



Fonte: Autoria própria.

Concluída a retificação, os corpos de prova foram levados até uma Prensa Hidráulica (Figura 4), com capacidade de 2000kN, onde foi feita a ruptura dos blocos através do método de resistência à compressão simples, como pode ser observado na Figura 5.

A resistência (expressa em MPa) foi obtida pela relação entre a força aplicada e a área da seção transversal do corpo-de-prova.

Figura 5: Prensa Hidráulica com potência de até 2000kN, utilizada para ruptura dos corpos-de-prova.



Fonte: Autoria própria.

Figura 6: Execução do ensaio de resistência à compressão simples, realizado no Laboratório de Construções da URI – Campus II – Erechim.



Fonte: Autoria própria.

2.2.3 Classificação dos blocos de concreto e resíduo, com relação à periculosidade

Buscando avaliar e diferenciar os contaminantes presentes nos resíduos eletrônicos livremente dispostos ao ambiente e também após encapsulados nos blocos de concreto, de forma classificar os blocos e o resíduo potencialmente gerado, para todas as configurações de amostras, os materiais foram submetidos a dois ensaios: lixiviação e solubilização, de acordo com as normas NBR 10005 e 10006 (ABNT, 2004).

Estes ensaios avaliam a estabilidade química dos resíduos quando estão em contato com soluções líquidas, determinando a capacidade de transferência das substâncias orgânicas e inorgânicas presentes do resíduo estudado, permitindo assim verificar o grau de imobilização dos contaminantes (ROCCA, 1993) e também classificar o resíduo, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), como Classe I – Perigoso, Classe IIA - Não Inerte e Classe IIB – Inerte.

Segundo Chamie, que argumentou:

“A concentração do contaminante, padrão primário de avaliação de qualidade da água, é frequentemente utilizada como padrão para o teste de lixiviação. Na avaliação da lixiviabilidade do material, é feita uma comparação entre a concentração do contaminante no lixiviado e no resíduo bruto. Estes valores indicam a porção de resíduo liberada para o meio. Se o tempo de duração do ensaio é conhecido, então é possível determinar-se a taxa de lixiviação do resíduo.” (CHAMIE, apud CAUDURO, 2012, p. 02).

Seguindo os padrões da norma NBR 10005 (ABNT, 2004) – *que fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR 10004 como classe I – perigosos – e classe II – não perigosos*, o ensaio de lixiviação foi executado no Laboratório de Efluentes e Resíduos da UFFS. Foram preparadas 6 amostras, conforme apresentados na Tabela 2, sendo utilizada massa inicial de 50 g.

Tabela 2: Configuração das amostras preparadas para execução do ensaio de lixiviação para resíduos sólidos.

Amostra	Configuração
CP	Concreto puro
PB	Resíduo eletrônico bruto
2A	2% de resíduo substituído na areia
5A	5% de resíduo substituído na areia
2B	2% de resíduo substituído na brita
5B	5% de resíduo substituído na brita

As amostras foram misturadas em 1 Litro da Solução de Extração nº2, preparada conforme a NBR 10005 (ABNT, 2004) e ficaram sob agitação no agitador rotatório durante 18 horas, em temperatura ambiente, com rotação de 30 rpm. Posteriormente, as amostras foram filtradas através de uma Filtro de Bomba à Vácuo (Figura 6), obtendo assim o extrato lixiviado.

Após a obtenção do extrato de lixiviado, foram analisados os parâmetros específicos, conforme anexos NBR 10004 (ABNT, 2004), por meio de espectrometria de emissão por plasma (ICPE – Plasma), na central analítica da UFFS.

Figura 7: Filtração ocorrendo com auxílio da bomba de filtração à vácuo, para obtenção de extrato lixiviado.

Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma, foram também realizados os ensaios de solubilização, que permite classificar o resíduo, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), classe II a – não inertes – e classe II B – inerte, caso os mesmos não forem anteriormente classificados como Classe I - Perigosos.

O ensaio de solubilização foi executado conforme a NBR 10006 (ABNT, 2004). Amostras de todas as configurações (conforme Tabela 5), em duplicata, foram agitadas por 5 minutos e então mantidas em água deionizada, em recipiente tampado por 7 dias (Figura 7), em temperatura ambiente. Após os 7 dias, as amostras foram filtradas através de uma Filtro de Bomba à Vácuo (Figura 6), obtendo assim o extrato solubilizado. Após realizou-se a análise quantitativa dos parâmetros específicos, conforme anexos NBR 10004 (ABNT, 2004), por meio de espectrometria de emissão por plasma (ICPE – Plasma), na central analítica da UFFS.

Figura 8: Amostras de ensaio de solubilização em repouso em água deionizada por 7 dias, para posterior filtração e análise.



Fonte: Autoria própria.

Concluída esta etapa, foi possível interpretar os dados, comparando com os anexos F e G, da NBR 10004 (ABNT, 2004) e classificar o resíduo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da brita

O objetivo da análise granulométrica é o conhecimento da quantidade e da natureza das partículas de um material. A análise granulométrica para materiais granulares é realizada através do peneiramento.

A granulometria da brita pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3: Análise granulométrica feita na brita disponibilizada, para posterior classificação e caracterização.

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	%
25	0	0
19	37,21	7,43
9,5	388,12	77,57
4,75	73,71	14,73
2,36	0,96	0,192

Utilizando a Equação 1, foi possível obter o peso específico da brita, correspondente à $2,357\text{g/cm}^3$, tornando possível calcular a massa de brita a ser substituída pelo equivalente de resíduos eletrônicos, disponíveis na Tabela 4.

Tabela 4: Quantidade de agregado grosseiro a ser substituído pelo resíduo eletrônico na fabricação dos blocos.

Quantidade Substituída (%)	Massa total (g)	Massa substituída (g)
2	1821,00	36,42
5	1850,00	93,00

3.2 Caracterização da areia

A análise granulométrica realizada para a areia pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5: Análise granulométrica feita na areia disponibilizada, para posterior classificação e caracterização.

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	%
4,75	6,74	1,34
2,36	6,16	1,23
1,18	37,16	7,43
0,60	89,64	17,93
0,425	72,79	14,56
0,300	102,67	20,53
0,212	97,71	19,54
0,150	48,4	9,68
0,075	32,54	6,51
Materiais finos (silte)	6,18	1,23

Concluída a análise granulométrica e com o auxílio da Equação 2, foi determinado o peso específico da areia, sendo este, equivalente à $2,64\text{g/cm}^3$, sendo então possível calcular a quantidade de areia a ser substituída por resíduo eletrônico para cada configuração de corpo de prova (Tabela 6).

Tabela 6: Quantidade de agregado fino a ser substituído pelo resíduo eletrônico na fabricação dos blocos.

Quantidade Substituída (%)	Massa total (g)	Massa substituída (g)
2	2410,00	48,20
5	2449,70	122,48

3.3 Caracterização do resíduo eletrônico

A trituração dos resíduos sólidos eletrônicos ocorreu para que este pudesse ser um substituinte dos componentes agregados do concreto. A caracterização granulométrica pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7: Caracterização granulométrica dos Resíduos Eletrônicos.

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	%
9,50	0	0
6,30	109,88	28,08
4,75	152,40	38,95
4,00	76,39	19,52
2,36	37,93	9,70
1,70	14,63	3,75

Com granulometria predominante entre 6,30 e 4,00mm, o resíduo eletrônico consiste em uma granulometria média, superior a um agregado fino (areia) e inferior a um agregado grosso (brita). Desta forma, optou-se por fazer a substituição separadamente entre os agregados, o que tornou possível obter uma gama maior de resultados e análises.

3.4 Análise de resistência à compressão simples

Todos os corpos de prova apresentaram o mesmo tipo de ruptura. Como apresentado na NBR 5739 (ABNT, 1994) a ruptura apresentada foi a Colunar, observável nas Figuras 8 e 9.

Figura 9: Configuração da ruptura decorrente da análise de resistência à compressão simples.



Fonte: Autoria própria

Figura 10: Esboços dos tipos de rupturas características para os procedimentos de análise de resistência à compressão simples.

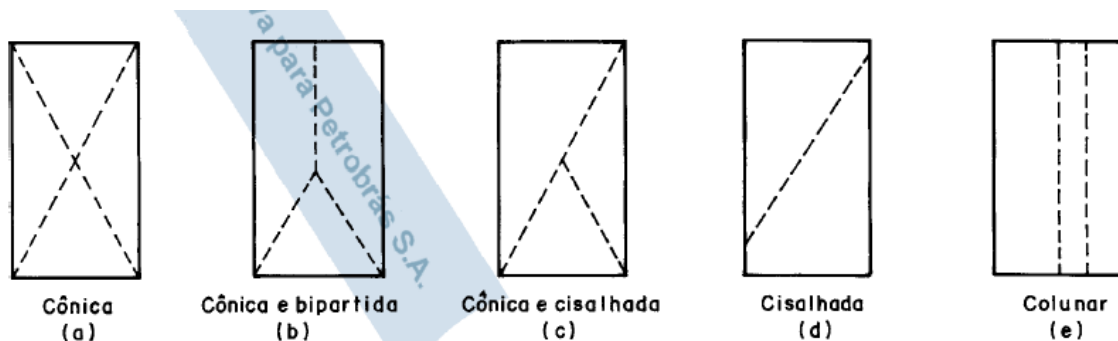


Figura - Esboço dos tipos de ruptura

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 1994).

Por vias de comparação, é possível observar na Tabela 8 que, com a substituição de resíduo eletrônico em 2%, ambos os agregados apresentaram resistência à compressão superior ao concreto puro, mostrando um bom comportamento do material e a viabilidade da aplicação, principalmente quando substituído em 2% da quantidade total de areia.

Tabela 8: Resultados da análise de resistência à compressão, em MPa.

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

Desta forma, fica comprovada a aplicabilidade dos resíduos eletrônicos como substituinte de uma pequena porção dos agregados, principalmente na condição de substituir em 2% do peso equivalente de areia, onde os resultados foram mais otimistas, podendo este concreto ser utilizado para determinadas atividades da construção civil, principalmente como material de vedação, onde não será exigida força estrutural.

3.5 Análise de extrato lixiviado

De acordo com o que consta na NBR 10004 (ABNT, 2004), “*um resíduo é classificado como tóxico se uma amostra representativa dele contiver qualquer um dos contaminantes em concentrações superiores aos valores constantes no anexo F*”, e, classificado como perigoso quando apresenta características que “*em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, pode apresentar riscos ao meio ambiente, quanto o resíduo for gerenciado de forma inadequada*”.

Neste sentido, a Tabela 9 apresenta os resultados da análise de extrato do ensaio de lixiviação e a comparação dos mesmos com o anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004).

Como pode ser observado em todas as amostras, foram pelo menos dois os elementos encontrados com parâmetros superiores ao limite máximo do Anexo F, da ABNT 10004 (ABNT, 2004), o que permite classificar o resíduo como tóxico e conseqüentemente perigoso.

Destaque para o Mercúrio, encontrado com valores elevados para todas as amostras que continham concreto, e também para o Chumbo, este encontrado principalmente no resíduo eletrônico bruto, mas também recorrente nas demais amostras.

Se tratando de Arsênio, Mercúrio e Selênio, estes, elementos presentes em todas as amostras que continham concreto, são elementos presentes na composição do mesmo, não sendo possível obter uma redução da concentração.

Tabela 9: Resultado da análise de extrato de lixiviado para classificação do resíduo, em mg/L.

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

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

Por vias de comparação, observa-se que, para a Prata, o Mercúrio e Selênio, houve um aumento de concentração, do resíduo bruto, para as amostras com concreto, constatando-se então, que são elementos já presentes na composição cimentícia, por outro lado, o resíduo eletrônico bruto apresenta valores superiores às amostras de resíduo incorporadas, para a concentração de Alumínio, Bário, Cobre, Ferro, Zinco e principalmente Chumbo, que ao serem diluídas na massa cimentícia sofrem uma perda significativa de suas concentrações, comprovando os benefícios da aplicabilidade, mesmo alguns valores permanecendo ainda acima dos limites máximos estabelecidos.

Cabe ressaltar que o ensaio de lixiviação é realizado em condições agressivas, para resíduos de construção e demolição, não caracterizando perfeitamente o comportamento do lixiviado enquanto o resíduo eletrônico ainda está encapsulado no concreto, condição na qual o potencial de lixiviação pode ser praticamente inexistente.

Então, uma análise de toxicidade destes materiais, em tais condições, não são passíveis de execução. De todo modo, os resultados representam perfeitamente o potencial de contaminação dos resíduos eletrônicos e dos blocos de concreto quando estes passarem a ser um resíduo.

3.6 Análise de extrato solubilizado

A análise de extrato solubilizado possui a função de classificar, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos definidos como Classe II - Não perigosos, como classe II A

- Não Inertes ou classe II B – Inertes. Porém, como visto anteriormente, devido ao fato do resíduo já ter sido classificado como Resíduo Classe I – Perigosos, devido a sua toxicidade apresentada nos ensaios de lixiviação, não se fez necessária a utilização das análises do extrato de solubilizado.

Por via de observação, os resultados obtidos na análise de solubilizado estão disponíveis na Tabela 10.

Tabela 10: Resultado da análise de extrato solubilizado para classificação do resíduo, em mg/L.

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

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados e, a técnica de reciclagem de resíduos sólidos eletrônicos como agregado na fabricação de concreto para a construção civil, pode ser uma medida eficaz para dar destinação ambientalmente correta para estes componentes, visando a redução de impactos ambientais.

Para quantidades de 2 e 5% de substituição do agregado convencional pelo material reciclado, obteve-se os seguintes valores: Concreto puro – 4,27MPa; Substituição de 2% da areia – 5,26MPa; 5% da areia – 3,51MPa; 2% da brita – 4,44MPa e 5% da brita – 3,92MPa. A substituição em 5% para qualquer dos agregados, implicou em uma resistência inferior à resistência da amostra de concreto puro. Por outro lado, a análise de resistência à compressão simples mostrou melhorias na resistência das amostras com resíduos eletrônicos, quando substituído 2% do agregado fino e também 2% do agregado grosseiro, comprovando mecanicamente que incorporar o E-lixo na matriz cimentícia, pode ser uma boa alternativa para destinação do mesmo

Comprovou-se também, através nas análises de lixiviação e solubilização que as concentrações de Ag, Ba e Cr, apresentaram concentrações aceitáveis, enquanto que, As, Mn e Pb, extrapolaram os limites permitidos, sendo que estes são os principais contaminantes presentes no resíduo eletrônico bruto, os mesmos são consideravelmente reduzidos após sua diluição no concreto, o que implica em redução dos impactos em comparação à disposição do resíduo eletrônico bruto, de forma incorreta.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004. **Resíduos Sólidos – Classificação**, Brasil, 2004 (ABNT NBR 10.004/2004);

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.005. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**, Brasil, 2004 (ABNT NBR 10.005/2004);

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.006, **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**, Brasil, 2004 (ABNT NBR 10.006/2004);

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007, **Amostragem de resíduos sólidos**, Brasil, 2004 (ABNT 10.007/2004);

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.655, **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**, Brasil, 2006 (ABNT 12.655/2006);

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5.739, **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**, Brasil, 1994 (ABNT 5.739/1994);

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9.776, **Agregados, Determinação da massa específica Chapman**, Brasil, 1994 (ABNT 9.776/1994);

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.211, **Agregado para concreto - Especificação**, Brasil, 2006 (ABNT 7.211/2009);

BRASIL. Lei nº 12305, de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**.

CAUDURO, Fernanda. **Avaliação Comparativa de testes de lixiviação de resíduos sólidos**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

CHAMIE, S. **Encapsulamento de resíduos de lamas galvânicas através da solidificação em matriz de cimento**. São Paulo, 1994. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul na escala de apresentação 1:750.000**. Porto Alegre – RS, 2006.

Li, J.; SHRIVASTAVA, P.; GAO, Z.; ZHANG, H-C. Printed circuit board recycling: A state of the art survey. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, v. 27, p. 33-42, 2004. DOI 10.1109 / TEPM.2004.830501.

GUO, J.; GUO, J.; XU, Z. **Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards**: A review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 168, p. 567-590, 2009.

NAIA, Gumercindo Lúcio. **Desenvolvimento de produto sustentável: Aproveitamento de placas de circuito impresso descartadas como agregado na fabricação de blocos de alvenaria para a construção civil**. 2014. 139 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Gestão sustentável de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos na América Latina**. 66 p. Maio. 2015.

ROCCA, A.C.C et al. **Resíduos Sólidos Industriais**. CETESB, 2ª Ed. São Paulo, 1993.

SILVA, Janari Rui Negreiros da. **Lixo eletrônico: um estudo de responsabilidade ambiental no contexto do instituto de educação ciência e tecnologia do Amazonas – IFAM Campus Manaus**. 2010. Curso de Educação Ambiental, Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, 2010.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 7ª edição. Porto Alegre. Globo. 1980. 307 p.

Wálisson André Vogt

Pedro Eugênio Gomes Boehl (Orientador)