



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**  
**LABORATÓRIO DE GESTÃO AMBIENTAL E TRATAMENTO DE RESÍDUO**



**DISSERTAÇÃO MESTRADO**

**Poliana Pinheiro da Silva**

**Avaliação do Cromo Contido em Resíduo Sólido de Laboratório e  
Materiais Solidificados e Estabilizados para Confecção de Blocos**

**CAMPINA GRANDE**  
**Mai-2018**

**POLIANA PINHEIRO DA SILVA**

**Avaliação do Cromo Contido em Resíduo Sólido de Laboratório e  
Materiais Solidificado e Estabilizado para Confecção de Blocos**

Defesa de dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito exigido para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador:

Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito

**Campina Grande - Paraíba**

**2018**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA MARIA ANTONIA DE SOUSA CRB 15/398

S586a Silva, Poliana Pinheiro da.  
Avaliação do cromo contido em resíduo sólido de laboratório e materiais solidificado e estabilizado para confecção de blocos / Poliana Pinheiro da Silva. – Campina Grande-PB, 2018.  
98 f. : Il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito".

Referências.

1. Resíduos Sólidos - Tratamento. 2. Resíduos Sólidos - Aproveitamento. 3. Cromo - Estabilização. I. Brito, André Luiz Fiquene de. II. Título.

CDU 628.4.045(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

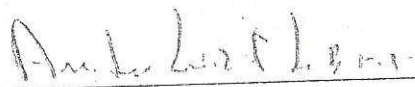
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DE DISSERTAÇÃO  
DA ALUNA POLIANA PINHEIRO DA SILVA

TÍTULO: Avaliação do Cromo Contido em Resíduo Sólido de Laboratório e  
Materiais Solidificados e Estabilizados para Confeccção de Blocos.

COMISSÃO EXAMINADORA

CONCEITO

Prof. André Luiz Fiquene de Brito (Doutor)

  
\_\_\_\_\_  
(Orientador)

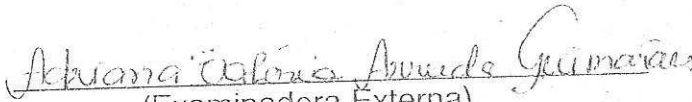
Aprovado

Prof. José Jailson Nicácio Alves (Doutor)

  
\_\_\_\_\_  
(Examinador Interno)

APROVADO

Prof. Adriana Valeria Arruda Guimarães (Doutora)

  
\_\_\_\_\_  
(Examinadora Externa)

APROVADO

Campina Grande, 30 de maio de 2018

## AGRADECIMENTOS

- ✓ Agradeço primeiramente a Deus, pois acredito que sem ele em minha vida coisas boas não seriam possíveis de acontecer.
- ✓ A minha mãe e a minha vó por estarem sempre ao meu lado, porém aguentando comigo todas as dificuldades que passamos nesse último ano de mestrado, por me darem força para não desistir, e mostrar que Deus está acima de tudo e de todos.
- ✓ A meu noivo que mesmo em todas conturbações, que passamos nesse último ano esteve sempre me dando força e mostrando o quanto sou capaz.
- ✓ A meus amigos: Os intitulados por Miguxos, que mais que amigos de Universidade, se tornaram amigos para a vida toda, aos amigos que conquistei nesses dois anos de mestrado, e principalmente os meus companheiros de longas horas de estudo, Isabela Alves e Alain Charles.
- ✓ A todos que fazem parte do LABGER, em especial a Fernanda Lima que Deus colocou ao meu lado nesses dois anos de mestrado, que compartilhou comigo todos os momentos de alegrias e tristezas e esteve sempre disposta a me ajudar.
- ✓ Ao meu orientador, professor Dr. André Luiz Fiquene de Brito, pela oportunidade a mim oferecida, pelos ensinamentos valiosos repassados ao longo desses anos.
- ✓ A toda UAEQ, A coordenação de Pós Graduação em Engenharia Química, na pessoa de Maricê, que com paciência e humildade sempre esteve disposta a tirar minhas dúvidas quando necessário, o meu muito obrigado.
- ✓ A CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

*“Não desista enquanto você ainda for capaz de fazer um esforço a mais. É nesse algo a mais que está a sua vitória”*

**SILVA, Poliana Pinheiro da. Avaliação do Cromo Contido em Resíduo Sólido de Laboratório e Materiais Solidificado e Estabilizado para confecção de Blocos.**2018. 98 p. Seminário de dissertação Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.

## **RESUMO**

Os resíduos gerados nas Universidades representam 1% do total de resíduo em relação à outras fontes geradoras de resíduo sólidos, porém apresentam dificuldade no tratamento devido a quantidade e diversidade de compostos presente em um único resíduo. Os resíduos são classificados de acordo com características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (Classe I) ou biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (classe II A ou classe II B). Quando são classificados em perigosos causam danos à saúde e ao meio ambiente. Uma alternativa de tratamento é a estabilização por solidificação, que promove a incorporação dos resíduos a matrizes cimentícias. O objetivo principal deste trabalho foi realizar a avaliação do metal pesado Cromo contido nos Resíduos Sólidos de Laboratórios para possível uso em Blocos sem função estrutural. No procedimento experimental, foi adotado o planejamento no delineamento do tipo *one-way* com análise de regressão. A primeira etapa consistiu em determinar quanto foi liberado de cromo para o meio ambiente, a partir do teste de lixiviação; o resíduo sólido de laboratório bruto foi classificado em classe I. Para definir a melhor faixa de incorporação de resíduo foram confeccionados corpos de prova para realização de testes preliminares. Os corpos de prova foram confeccionados à base de cimento Portland pozolônico, areia fina, brita e resíduo sólido passivo do laboratório de engenharia química (RSL), os quais foram submetidos a ensaios de lixiviação para classificação dos mesmos. A partir destes foram definidas as porcentagens de 5, 20 e 35% RSL, e posteriormente realizado testes de integridade/ durabilidade e imobilização de contaminantes. Os melhores resultados de todas as análises, foram encontrados para a incorporação de 5% de resíduo sólido de laboratório. As matrizes com 5 e 20% passaram de classe I (perigosos) para classe IIB( não perigosos e inertes). A matriz com 35% foi aprovada no teste de integridade/durabilidade, mas reprovada no teste de lixiviação com 0,09mg/l de cromo total, valor 55,56% acima do limite máximo permitido. Os materiais tratados poderão ser usados na fabricação de blocos com função não estrutural após avaliação técnica do uso específico adotado na construção civil.

**Palavras - chave:** Passivo; Tratamento, Universidade, Planejamento; Contaminante.

**SILVA, Poliana Pinheiro da. Chromium Evaluation of Laboratory Solid Waste and Stabilized Materials for Building Blocks.**2018. 98 p. Master's Dissertation Seminar in Chemical Engineering. Federal University of Campina Grande.

## **ABSTRACT**

The residues generated in the universities represent 1% of the total waste in relation to other sources of solid waste, but they present difficulties in the treatment due to the quantity and diversity of compounds present in a single residue. Residues are classified according to flammability, corrosivity, reactivity, toxicity and pathogenicity (Class I) or biodegradability, combustibility or water solubility (Class II A or Class II B) characteristics. When classified as hazardous they cause damage to health and the environment. An alternative treatment is stabilization by solidification, which promotes the incorporation of the residues to cementitious matrices. The main objective of this work is to perform the evaluation of the heavy metal Chromium contained in the Solid Waste of Laboratories for use in Blocks without structural function. In the experimental procedure, the planning was adopted in the one-way type design with regression analysis. The first step consisted in determining how much was released from chromium to the environment, from the leaching test; the crude laboratory solid waste was classified in class I. To define the best range of residue incorporation, test specimens were prepared for preliminary tests. The test specimens were made with pozolonic Portland cement, fine sand, gravel and passive solid waste from the chemical engineering laboratory (RSL), which were submitted to leaching tests to classify them. From these, the percentages of 5, 20 and 35% RSL were defined, followed by integrity / durability tests and immobilization of contaminants. The best results of all the analyzes were found for incorporation of 5% (RSL). The matrices with 5 and 20% passed from class I to class IIB, the matrix with 35% was approved in the integrity / durability test, but failed in the leaching test with 0.09mg / l of chromium above the maximum limit.

**Key - words:** Passive; Treatment, University, Planning; Poisoning.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Resíduos de laboratórios químicos gerados nas Universidades.....	19
Figura 2- Esquema de E/ S em matriz de cimento portland .....	27
Figura 3- Representação esquemática para a hidratação do cimento Portland.....	27
Figura 4- Absorção de água dos blocos de concreto fabricados com o resíduo. ....	35
Figura 5- Absorção de água dos corpos de prova em relação à porcentagem de resíduos.....	36
Figura 6- Etapas desenvolvidas nesta pesquisa .....	47
Figura 7- Preparação dos corpos de prova. ....	51
Figura 8- Equipamento de resistência a compressão.....	52
Figura 9- Ensaio de Capacidade de absorção de água.....	53
Figura 10- Estufas para realização os experimentos de Umidificação/Secagem .....	54
Figura 11- Equipamento Rotativo de Frascos .....	55
Figura 12- Fluxograma de Avaliação de Materiais Estabilizados por Solidificação de Resíduos .....	61
Figura 13- Modelo Ajustado.....	77
Figura 14- Fluxograma de Rotas de destinação final .....	82

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Classificação de resíduos .....25

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Geração e lançamento inadequado de resíduos .....	22
Tabela 2- Nomenclatura atual dos Cimentos Portland .....	31
Tabela 3- Teor dos elementos analisados na lixiviação e concentração – limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação para classificação de resíduos sólidos .....	38
Tabela 4- Teor dos elementos no solubilizado e concentração – limite máximo no extrato obtido no ensaio de solubilização para classificação de resíduos sólidos .....	39
Tabela 5- Teor dos elementos no solubilizado e concentração – limite máximo no extrato obtido no ensaio de solubilização para classificação de resíduos sólidos .....	39
Tabela 6- Dados ensaio lixiviação do cimento Fondu com 28 dias de hidratação .....	40
Tabela 7- Concentração de metais nos lixiviados das matrizes de argamassa contendo lodo seco do tratamento de efluente de curtume com o coagulante sulfato de alumínio .....	40
Tabela 8- Concentração de metais nos lixiviados das matrizes de argamassa contendo lodo seco do tratamento de efluente de curtume com o coagulante $PG\alpha 21Ca$ .....	40
Tabela 9- Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado dos blocos fabricados com resíduo aos 28 dias de cura. ....	41
Tabela 10- Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado dos blocos fabricados com resíduo aos 28 dias de cura .....	42
Tabela 11- Composição da Matriz Cimentícia dos Corpos de Prova.....	50
Tabela 12- Análise de variância (ANOVA) .....	57
Tabela 13 - Critérios de integridade/Durabilidade e limite máximos permitidos .....	59
Tabela 14- Utilização do material E/S.....	60
Tabela 15- Especificações da norma brasileira para peças de concreto .....	62
Tabela 16- Caracterização dos sólidos totais e suas frações .....	63
Tabela 17-caracterização físico-química .....	63
Tabela 18 – Resultados ST, STF, STV, umidade.....	64
Tabela 19- Teor de metais presentes no extrato lixiviado do cimento, areia e brita. ....	65
Tabela 20- Teor de cromo presente no extrato lixiviado do Resíduo sólido de laboratório.....	66
Tabela 21- Teor de metais presentes nos corpos de prova .....	67
Tabela 22- Teor de Cromo.....	68
Tabela 23. Respostas do ensaio de Resistência à Compressão (RC).....	69
Tabela 24. Respostas do ensaio de Umidificação e Secagem (U/S). ....	70
Tabela 25- Resultados de U/S encontrados por diversos autores .....	71
Tabela 26. Respostas do ensaio de Capacidade de Absorção de Água. ....	72

Tabela 27-Resposta da concentração dos metais no extrato lixiviação.....	74
Tabela 28-Resposta da concentração dos metais no extrato solubilizado .....	75
Tabela 29- Análise estatística.....	78
Tabela 30. Balanço de massa e eficiência do processo de E/S no extrato lixiviado. ....	80
Tabela 31. Classificação dos materiais E/S. ....	81

## LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento <i>Portland</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
CAA	Capacidade de absorção de água
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento <i>Portland</i>
E/S	Estabilização por Solidificação
ESC	Escória de ferro-ligas de Manganês
IFES	Instituições Federais de Ensino Superior
LGRQ	Laboratório de Gestão de Resíduos Químicos
NBR	Norma Brasileira de Normas Técnicas
PFM	Pó de despoeiramento da Produção de Liga de Manganês
PGR	Programas de Gerenciamento de Resíduos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PROGERE	Programa Gerenciamento de Resíduos da Universidade Federal do Ceará
PS	Pedra Sabão
RC	Resistência a compressão
RSI	Resíduos sólidos industriais
SPC	Dragagem de canais pluviais
U/S	Umidificação/Secagem
UAEQ	Unidade Acadêmica de Engenharia Química
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNB	Universidade de Brasília
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos estados Unidos
USP	Universidade de São Paulo

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	4
RESUMO .....	6
LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE QUADROS .....	9
.....	9
LISTA DE TABELAS .....	10
LISTA DE SIGLAS .....	12
<b>CAPÍTULO 01</b> .....	<b>15</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1. OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
1.1.1. <i>Geral</i> .....	17
1.1.2. <i>Específicos</i> .....	17
<b>CAPÍTULO 02</b> .....	<b>18</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1. RESÍDUOS GERADOS EM UNIVERSIDADES</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2. TIPOS DE RESÍDUOS DE LABORATÓRIO</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3. CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS</b> .....	<b>22</b>
<b>2.4. GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS</b> .....	<b>23</b>
<b>2.5. ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO (E/S)</b> .....	<b>26</b>
2.5.1. <i>Classificação do Processo de Estabilização por Solidificação</i> .....	30
2.5.2. <i>Cimento Portland como Aglutinante</i> .....	30
<b>2.6. EFEITO DO CROMO NO MEIO AMBIENTE E NA ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO</b> .....	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO 03</b> .....	<b>45</b>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>45</b>
<b>3.1. CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO RSL, CIMENTO E AGLOMERANTES</b> .....	<b>48</b>
<b>3.2. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>48</b>
<b>3.3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS</b> .....	<b>49</b>
<b>3.4. AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE E DURABILIDADE</b> .....	<b>51</b>
3.4.1. <i>Resistência a compressão</i> .....	51
3.4.2. <i>Capacidade de Absorção de Água</i> .....	52
3.4.3. <i>Umidificação e secagem</i> .....	54
<b>3.5. AVALIAÇÃO AMBIENTAL E IMOBILIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES</b> ....	<b>54</b>
3.5.1. <i>Lixiviação</i> .....	54

3.5.2. Solubilização .....	55
<b>3.6. EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DOS CONTAMINANTES.....</b>	<b>55</b>
<b>3.7. DETERMINAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA DOS CONTAMINANTES.....</b>	<b>56</b>
<b>3.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS .....</b>	<b>57</b>
<b>3.9. AVALIAÇÃO DE ROTAS PARA DESTINAÇÃO FINAL E UTILIZAÇÃO APÓS A ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO .....</b>	<b>59</b>
<b>CAPÍTULO 04 .....</b>	<b>63</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>63</b>
<b>4.1. CARACTERIZAÇÃO DO RSL, CIMENTO E AGLOMERANTES.....</b>	<b>63</b>
<b>4.2. CLASSIFICAÇÃO DO RSL, CIMENTO E AGLOMERANTES.....</b>	<b>65</b>
<b>4.3. ANALISE ESTATISTICA DOS RESULTADOS .....</b>	<b>76</b>
<b>4.4. DETERMINAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA E EFICIENCIA DE RETENÇÃO DOS CONTAMINANTES. ....</b>	<b>79</b>
<b>4.5. AVALIAÇÃO DE ROTAS PARA DESTINAÇÃO FINAL E UTILIZAÇÃO APÓS A ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO.....</b>	<b>81</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>84</b>
<b>SUGESTÕES FUTURAS .....</b>	<b>84</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>
APENDICE A – Ensaio de Lixiviação: ABNT NBR 10.005, 2005.....	94
APENDICE B – Memória de Cálculos dos Corpos de prova .....	96

## CAPÍTULO 01

### 1. INTRODUÇÃO

Uma fonte relevante de geração de resíduos perigosos são as Instituições de Ensino e Pesquisa, os Programas de Gerenciamento de Resíduos (PGR) foram implantados a partir da década de 1970 nas Universidades e Centros de pesquisas de países desenvolvidos.

Algumas universidades possuem programa de gerenciamento de resíduo, que na maioria das vezes tem como primeiro passo separar produtos que estão dentro e fora da validade, para uma possível utilização. Em algumas universidades cada departamento fica responsável pela gestão, tratamento e disposição adequada do resíduo gerado, contudo na maioria das vezes um método, como por exemplo a neutralização, serve para tratar determinado resíduo, mas não tem serventia para um tipo de resíduo oriundo de outra pesquisa, pois a composição muda a cada projeto e experimento.

De modo geral, o gerenciamento e identificação da constituição química aponta a periculosidade e toxicidade dos resíduos, estes quando classificados como perigosos aos serem lançados no meio ambiente sem tratamento prévio lixiviam contaminando plantas, animais e lençóis freáticos que estão próximos das Universidades.

Os resíduos perigosos, também podem causar danos à saúde humana, pois contém metais pesados que são substâncias naturais as quais muitas vezes estão presente no ambiente em baixos níveis, quando em quantidade maiores como nas indústrias e locais onde tenham sido descartados imprópriamente são perigosos ao ser humano.

Contaminantes como metais pesados são classificados como elementos essenciais, micro contaminantes, e ao mesmo tempo essenciais e micro contaminantes, os quais tem a capacidade de se acumularem nas células e a longo prazo causarem danos à saúde, como: insuficiência renal, lesões cerebrais, enfraquecimento das articulações, infertilidade, chegando até a gerar o câncer.

Apesar de tudo, existem algumas universidades ainda não contam com programas de gerenciamento e tratamento de resíduo. Tratam o gerenciamento como uma ação complexa devido a diversidade dos resíduo e dificuldade no tratamento devido a separação destes.

Atualmente o método de incineração é um dos mais usados, porém quando se trata de resíduo sólido de laboratório as empresas responsáveis por esse serviço alegam



que o procedimento não é vantajoso devido à grande mistura de composto em um único resíduo, tendo em vista a dificuldade de separação e consequentemente o auto custo.

Uma solução alternativa para tratar o resíduo sólido de laboratório é a estabilização por solidificação (E/S), em que os contaminantes são aprisionados em uma matriz de cimento e não lixiviam em valores superiores ao limite máximo e permissível pela legislação. Porém não existe publicações que mostrem a utilização desse método para tratamento dos resíduos gerados em universidades.

A estabilização por solidificação consiste na adição do resíduo tóxico em um material aglutinante, formando uma matriz sólida capaz de diminuir sua mobilidade e toxicidade. Esse fato acontece devido as reações que ocorrem no cimento, quando formado corpos de prova em proporções adequadas tem a capacidade de aprisionar os contaminantes no interior da partícula de cimento, ocorrendo reações químicas entre os contaminantes e aglomerantes ou processos de retenção física dos contaminantes.

A E/S apresenta vantagens como o baixo custo de materiais e equipamentos para mistura; habilidade de estabelecer barreira física mesmo em casos adversos; versatilidade na forma das propriedades de acordo com a aplicação.

Nesta pesquisa o resíduo sólido de laboratório contendo cromo é tratado a partir do método de E/S, este já é muito usado aplicado como forma de tratamento de contaminantes, pesquisas comprovam que a partir dessa técnica os resíduos perigosos saem de uma Classe I, para Classe II B, reduzindo assim sua toxicidade.

Além do tratamento proporcionado pelo método de estabilização por solidificação que é comprovado a partir de testes de imobilização dos contaminantes, as matrizes cimentícias geradas tem aplicabilidades estrutural ou não estrutural de acordo resistência das mesmas, pois o cimento utilizado no processo de estabilização tem influência sobre a resistência, podendo ser menos ou mais resistente de acordo com o tipo de cimento usado.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Geral

- ✓ Realizar a avaliação do metal pesado Cromo contido nos Resíduos Sólidos passivos do Laboratório de engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, e em Blocos sem função estrutural.

### 1.1.2. Específicos

- ✓ Caracterizar e Classificar o resíduo sólido passivo de laboratório, cimento e aglomerantes;
- ✓ Avaliar a integridade/ durabilidade das matrizes sob os aspectos de: resistência à compressão, capacidade de absorção de água e Umidificação/Secagem;
- ✓ Analisar a imobilização do Cromo Total com base nos ensaios de lixiviação, solubilização.
- ✓ Determinar a eficiência de retenção dos contaminantes e seu balanço de massa.
- ✓ Propor o uso do material estabilizado e solidificado para confecção de blocos não estruturais e/ou disposição final adequada.

## CAPÍTULO 02

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. RESÍDUOS GERADOS EM UNIVERSIDADES

De acordo com Oliveira Júnior (2012) sejam quais forem os processos de produção, transformação ou obtenção de materiais que contem produtos os quais não detêm valor comercial, serventia ou benefício para o homem são denominados como resíduos.

Segundo Bento e Paim (2015) nos últimos anos, a preservação do meio ambiente tem sido muito considerada, apresentando como principal objetivo o tratamento de resíduos químicos; que são imprópriamente escoados pelas pias das universidades ocasionando corrosão da tubulação, envenenamento de plantas e animais, contaminação dos lençóis freáticos que estão próximo das universidades e outros. A incineração é uma forma para dizimar os resíduos passivos (resíduos armazenados em frascos, em estoque). Contudo, são raras as empresas que dispõem de equipamentos apropriados para incineração e a maior parte não possibilita a incineração dos resíduos das universidades. Deste modo, a solução encontrada pelas instituições de ensino superior, é desempenhar o tratamento dos resíduos químicos na própria instituição.

Penatti *et al.* (2011) constataram que no estudo realizado sobre a produção de resíduos químicos em laboratórios de análises e pesquisas na área química, a quantidade gerada dos mesmos apresentou índices desconsideráveis quando comparados às indústrias de grande porte dessa mesma esfera, como as de produtos químicos e petroquímicos.

De acordo com Silva *et.al* (2015) em 2005 foi criado o Programa Gerenciamento de Resíduos da Universidade Federal do Ceará (PROGERE - UFC), que integra diversas intervenções que tem como objetivo a gestão apropriada dos inúmeros tipos de resíduos gerados na instituição e a conscientização da sociedade acadêmica com relação à questão ambiental. Com essas intervenções foi capaz analisar que muitos dos resíduos passivos eram reagentes (dentro ou fora do prazo de validade), que não era mais usufruído pelo alvo gerador, no entanto estavam em estado de uso.

Na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) existe um programa de gestão de resíduos separados em ações localizadas. A exemplo, do Centro de Veterinária

que realiza um importante trabalho no gerenciamento dos resíduos referentes aos infectantes que é reconhecido em nível de Brasil. O Instituto de Ciências Biológicas da mesma forma tem um programa de gerenciamento de seus resíduos. Os resíduos químicos são gerenciados com inúmeras ações em diferentes laboratórios para o pertinente controle dos mesmos (UFMG, 2014).

A Universidade de São Paulo (USP) conta com uma superintendência para a gestão ambiental. Incorporado a esta, existe um programa intitulada por “USP Recicla” que faz uso de numerosos informativos e orientações que tem como objetivo de minorar e recuperar os resíduos comuns (USP,2014).

Em 2009, o Laboratório de Gestão de Resíduos Químicos (LGRQ) da Universidade Federal de Lavras, começou suas tarefas realizando uma averiguação dos resíduos passivos e ativos de todos os laboratórios, sendo recolhido o total de 10 toneladas, estando os passivos destinados a uma empresa especializada (OLIVEIRA JUNIOR; 2012). A Figura 1 expõe as prováveis origens geradoras de resíduos químicos de uma Universidade.

Figura 1- Resíduos de laboratórios químicos gerados nas Universidades



FONTE: Sassioto, Salvador e Corneto (2004)

Como podemos perceber pela Figura 1 a maioria das ações realizadas nas universidades geram resíduos como a exemplo das pesquisas experimentais e aulas práticas realizadas em laboratório, os reagentes vencidos são diretamente considerados como resíduos passivos.

Oliveira Júnior (2012) em sua pesquisa ele afirma que ao analisar os departamentos da Universidade Federal de Lavras no ano de 2009, os resíduos químicos sólidos passivos somaram 961,53 kg, o Departamento de Química mesmo apresentando uma pequena contribuição para resíduos líquidos, teve 74% da quota na quantidade de resíduos sólidos. Essa quantia se deve a grande parcela de reagentes químicos “abandonados” em estoque, que com o passar do tempo perderam sua validade, transformando-os em resíduo químico sólido passivo. Já no ano de 2010 o LGRQ tratou um total de mais de três toneladas de resíduos químicos sólidos passivos. Uma tonelada foi disposta adequadamente como passivo ambiental e cinquenta e cinco quilos de reagentes vencidos foram concedidos aos laboratórios que solicitaram reagentes junto ao laboratório. Os resíduos que são encaminhados ao LGRQ podem sofrer quatro tipos de tratamento: POA (processos oxidativos avançados), precipitação de metais, destilação e neutralização.

A Universidade Federal do Rio de Janeiro desenvolve pesquisas na área de tratamento de metais pesados em resíduos laboratoriais, com a finalidade de recuperar e reutilizar substância de interesse, obter destinações seguras de descarte de material sólido e conseguir efluentes líquidos neutralizados (LIMA,2010).

Tavares *et al.* (2004) exhibe que o PGRQ-CENA/USP incorporou ao seu a adesão de práticas corretas de gestão de resíduos, a execução de inventários dos resíduos ativos e passivos, o tratamento e/ou reutilização de resíduos líquidos, sólidos e gasosos, e a capacitação e formação de pessoal.

Na Universidade Estadual da Paraíba foram elaborados trabalhos com o intuito de caracterizar os resíduos sólidos concebido na universidade, examinar o destino final destes, sensibilizar a comunidade acadêmica mediante a problemática ambiental e colaborar para a implantação da coleta seletiva (COSTA et al., 2004).

A partir da Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos nº 12.305/10 muitas IFES começaram a colocar em prática ações de gerenciamento de resíduos principalmente pela obrigatoriedade em se elaborar um plano de gerenciamento de resíduos. Infelizmente, o gerenciamento de resíduos em grande maioria das universidades só acontece com intuito de atender a legislação pertinente (MENDES, 2011).

## 2.2. TIPOS DE RESÍDUOS DE LABORATÓRIO

Os resíduos de laboratório são diferentes daqueles produzidos em unidades industriais por possuírem baixo volume, porém apresentam grande disparidade de composições, o que atrapalha a tarefa de designar um tratamento químico e/ou uma disposição final universal para todos (GERBASE,2005).

Santos e Souza (2013) afirmam que a perspectiva de se conservar a saúde, o meio ambiente, e a elaboração de um regime de redução de resíduos é uma ação que vem se expandindo também a pequenos geradores de resíduos, entre eles de instituições de ensino e de pesquisa, laboratórios de análises químicas e físico-químicas. Dessa forma os resíduos gerados por esses grupos são apontados pelos órgãos fiscalizadores como procedimento não impactantes, sendo assim, dificilmente são inspecionados quanto ao descarte de seus rejeitos químicos.

Os resíduos de laboratório podem ser divididos em dois tipos: resíduos ativos e resíduos passivos. O resíduo ativo são os resíduos gerados fruto das atividades rotineiras das Universidades, esses serão produzidos em maior quantidade, quanto maior forem às atividades executadas pelas Universidades (ensino, pesquisa, extensão, prestação de serviços médicos à comunidade etc.). O resíduo passivo engloba todo resíduo estocado, em regra não caracterizado, esperando destinação final. Que são integrados por restos reacionais, resíduos sólidos e frascos de reagentes vencidos. É habitual nos laboratórios de pesquisa e em menor proporção nos laboratórios voltados unicamente para o ensino, encontrar um estoque indesejável de resíduos químicos sólidos, líquidos e gasosos não caracterizados (LIMA 2010).

Imbroisi (2006) mostra que 144 dos 278 laboratórios presentes na Universidade de Brasília lidam com produtos químicos em suas práticas. Desses laboratórios, aproximadamente 31% destinam-se somente à pesquisa e 54% atuam tanto com pesquisa quanto com ensino. Desta maneira, o gerenciamento dos resíduos desenvolvidos nesses laboratórios é uma ação de grande complexidade, devido sua diversidade. Outro aspecto primordial a ser considerado é que, como boa parte dos laboratórios lança seus resíduos na pia, não podendo garantir que existe um monitoramento real do volume de resíduo químico gerado pelo laboratório.

Normalmente quase todo o resíduo gerado com volume de até 10 L é lançado “pia abaixo”. O mesmo acontece em laboratórios que produzem volumes mensais de resíduos maiores que 50 L. Em relação ao material sólido, por volta de 40% também é

descartado de forma errada, em lixo comum. A Universidade e Brasília - UnB remove de seu depósito de resíduos químicos entre 6 e 8 t de resíduos a cada dois anos, procedentes de suas diferentes unidades (IMBROISI, 2006). A Tabela 1 exibe o vínculo que existe entre volume de resíduos gerados e destinação inadequada, seja em “pia abaixo” ou em lixo comum.

Tabela 1- Geração e lançamento inadequado de resíduos

Quantidade gerada	Geração (%)	Lançamento “pia” e esgoto (%)	Lançamento inadequado/geração (%)
<1,0 L	35	33	94
1 – 10L	45	37	82
10 – 50L	7	8	*
>50 L	4	4	100
Massa sólida	5	2	40
Não sabem	4	16	**

FONTE: (Imbroisi, 2006).

De acordo com a Tabela 1 temos que 45% dos laboratórios geram entre 1 a 10 litros de resíduos por mês com 82% de descarte inadequado, apenas 5% dos laboratórios geram resíduo sólidos, porém a quantidade de resíduo sólido não foi informada o que se sabe é que 40% tem lançamento inadequado.

### 2.3. CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Schneider (2014) conceitua resíduos químicos como aqueles provenientes de operações laboratoriais de estabelecimento de ensino, pesquisa, produção e extensão, entre eles: produtos hormonais, antimicrobianos, citostáticos entre outros quanto gerados por serviço de saúde; resíduos saneantes como desinfetantes e desinfestantes; reagentes para laboratório contendo metais pesados; efluentes de reveladores e fixadores gerados pelo processamento de imagens.

Conforme a norma ABNT NBR 10004/04, o Quadro 1 mostra que os resíduos sólidos podem ser classificados em três categorias:

Quadro 1 - Classificação de resíduos

Classificação de resíduos	Características
Classe I – Resíduos perigosos	São aqueles que possuem uma ou mais das seguintes propriedades de periculosidade: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Deste modo, em virtude de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem ocasionar risco à saúde e ao ambiente.
Classe II A – Resíduos não perigosos e não inertes	São aqueles que não se encaixam nas Classes I e II B, e podem exprimir particularidades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
Classe II B – Resíduos não perigosos e inertes	São aqueles que quando sujeito a contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006/04, nenhum de seus constituintes foram solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

FONTE: ABNT-NBR(2004); Autor(2017).

De acordo com o Quadro 1 os resíduos são classificados em Classe I, Classe II A e Classe II B tendo as características respectivamente de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade; biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água; nenhum de seus constituintes são solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água. Os RSL são classificados como resíduos perigosos classe I.

#### 2.4. GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Em razão da grande geração de rejeitos a gestão de resíduos sólidos no Brasil é regida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em concordância e parcerias com órgãos estaduais e municipais. Seguindo as determinações do CONAMA,



os geradores de resíduos são encarregados pela gestão destes, declarando que sejam quantificados, armazenados, transportados e conduzidos para locais adequados onde possam ser reutilizados ou depositados corretamente conforme as normas determinadas na resolução (SILVA, *et.al*,2016)

Jardim (1998) afirma que universidades e, em específico, os Institutos e Departamentos de Química, efetuem programas de gestão de resíduos, não podendo mais ignorar a posição de geradora de resíduos, pois essa postura contradiz frontalmente o papel que a própria universidade executa quando avalia o impacto causado por outros órgãos geradores de resíduo.

Lima (2010) afirma que é válido mencionar o ambiente acadêmico como destaque pela procura de uma estabilidade ambiental e para isso, conta com as táticas da pedagogia ambiental. Estas implicam na união de práticas, identidades e saberes, de informações científicas e saberes popular. Promovendo a mudança de valores e de atitudes, essencial para o exercício da sustentabilidade ambiental. Sendo o ambiente acadêmico propício para início e incentivo desse esse processo.

A Política Nacional de Resíduo Sólidos - PNRS (BRASIL, 2010), orienta que em um plano de gerenciamento de resíduos é recomendado que tenha a descrição do empreendimento ou atividade; o reconhecimento dos resíduos sólidos gerados como origem, volume e caracterização; abrangendo os passivos ambientais a eles relacionados. Além da determinação dos encarregados pelas etapas do gerenciamento e dos procedimentos operacionais; a identificação das soluções conjuntas ou comum com outros geradores; os objetivos e maneiras relacionados à minimização da geração de resíduos sólidos, entre outros.

Segundo a PNRS nº 12.305/10, art. 21, um Plano de Gerenciamento Resíduos deve ter o seguinte conteúdo mínimo:

Art. 21. O plano de gerenciamento de resíduos sólidos tem o seguinte conteúdo mínimo:

I - Descrição do empreendimento ou atividade;

II - Diagnóstico dos resíduos sólidos gerados ou administrados, contendo a origem, o volume e a caracterização dos resíduos, incluindo os passivos ambientais a eles relacionados;

III - observadas as normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama, do SNVS e do Suasa e, se houver, o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos:

a) explicitação dos responsáveis por cada etapa do gerenciamento de resíduos sólidos;

b) definição dos procedimentos operacionais relativos às etapas do gerenciamento de resíduos sólidos sob responsabilidade do gerador;

IV - Identificação das soluções consorciadas ou compartilhadas com outros geradores;

V - Ações preventivas e corretivas a serem executadas em situações de gerenciamento incorreto ou acidentes;

VI - metas e procedimentos relacionados à minimização da geração de resíduos sólidos e, observadas as normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama, do SNVS e do Suasa, à reutilização e reciclagem;

VII - se couber, ações relativas à responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, na forma do art. 31;

VIII - medidas saneadoras dos passivos ambientais relacionados aos resíduos sólidos;

IX - periodicidade de sua revisão, observado, se couber, o prazo de vigência da respectiva licença de operação a cargo dos órgãos do Sisnama [...] (BRASIL,2010).

Reichert e Teixeira (2009) também aconselham que a realização do gerenciamento de resíduos sólidos deve ser regida por um plano de gerenciamento de resíduos. Este deve abranger as questões pertencentes à geração, segregação, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e disposição final. Através deste, se faz capaz definir os detalhamentos para a implantação, operacionalização e monitoramento de um sistema de gerenciamento de resíduos, baseado na legislação e normalização ambiental.

No Brasil, várias Instituições Federais de Ensino Superior IFES criaram programas de gerenciamento de resíduos químicos (PGRQ). Em relação as instituições federais, 44,6% possuem um programa consolidado ou estão com um plano traçado. Nas Universidades Estaduais o número é menor, apenas 28,6% possuem PGRQ em execução ou em desenvolvimento. Um projeto de gerenciamento de resíduos colabora para minimizar riscos, ou eliminar a insalubridade e periculosidade de vários locais, e também para motivar nos discentes, técnicos e docentes a percepção de que são competentes de gerar conhecimento e descartar corretamente o que possa causar risco grave à saúde ou ao ambiente (OLIVEIRA JUNIOR, 2012)

## 2.5. ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO (E/S)

Conforme Ivanov (2014) a técnica mais aplicada para disposição final de resíduos é a Estabilização por Solidificação (E/S), o qual consiste na adição do resíduo tóxico em um material aglutinante, formando uma matriz sólida capaz de diminuir sua mobilidade e toxicidade. De acordo com a USEPA (Agência de Proteção Ambiental dos estados Unidos), a expressão “estabilização por solidificação” se refere a um grupo geral de etapas que tratam uma variedade de resíduos, dentre eles sólidos e líquidos (SPENCE e SHI, 2005).

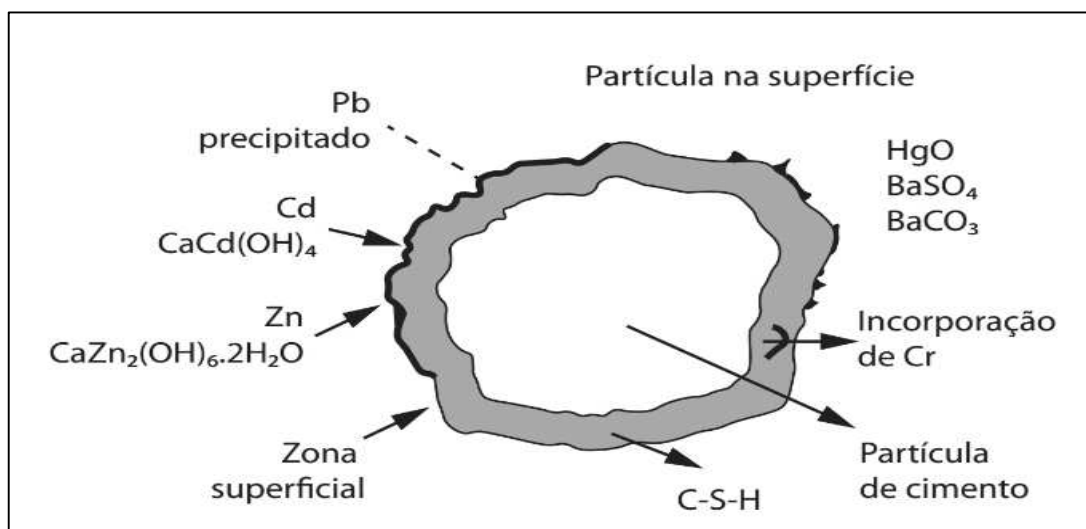
A estabilização por solidificação é usada como uma alternativa de pré – tratamento ou tratamento propriamente dito de resíduos sólidos perigosos que não podem ser descartados, reduzido, reciclado ou aplicado no meio ambiente em que foram formados na sua condição original (STEGEMANN; BUENFELD, 2003).

Segundo Kulakowski *et.al* (2016) a E/S apresenta vantagens e desvantagens que podem influenciar o processo, como desvantagens temos: Os corpos de prova que apresentam porosidade podem facilitar a lixiviação dos contaminantes quando não houver imobilização eficiente; o volume do resíduo pode aumentar em devido a adição do agente aglomerante, portanto são necessários pesquisadores experientes para determinar um método eficaz.

A E/S é um método não agressivo de imobilizar os integrantes perigosos presentes em um resíduo, pois não elimina ou diminui a quantidade de integrantes; apenas adsorve, encapsula ou muda a forma físico-química do constituinte no resíduo, gerando um produto menos lixiviável (SILVA, 2007).

De acordo com Conner (1990) no processo de estabilização por solidificação os contaminantes são retidos ou aprisionados no interior da partícula de cimento, ocorrendo reações químicas entre os contaminantes e aglomerantes ou processos de retenção física dos contaminantes. Quando é utilizado o cimento Portland comum para E/S de resíduos sólidos, o pH da matriz contribui para a transformação de cátions em hidróxidos, óxido e carbonatos insolúveis, incorporando íons metálicos à estrutura cristalina da matriz de cimento, os quais são aprisionados em diferentes regiões das partículas. A Figura 2 ilustra como acontece esse processo de incorporação dos contaminantes.

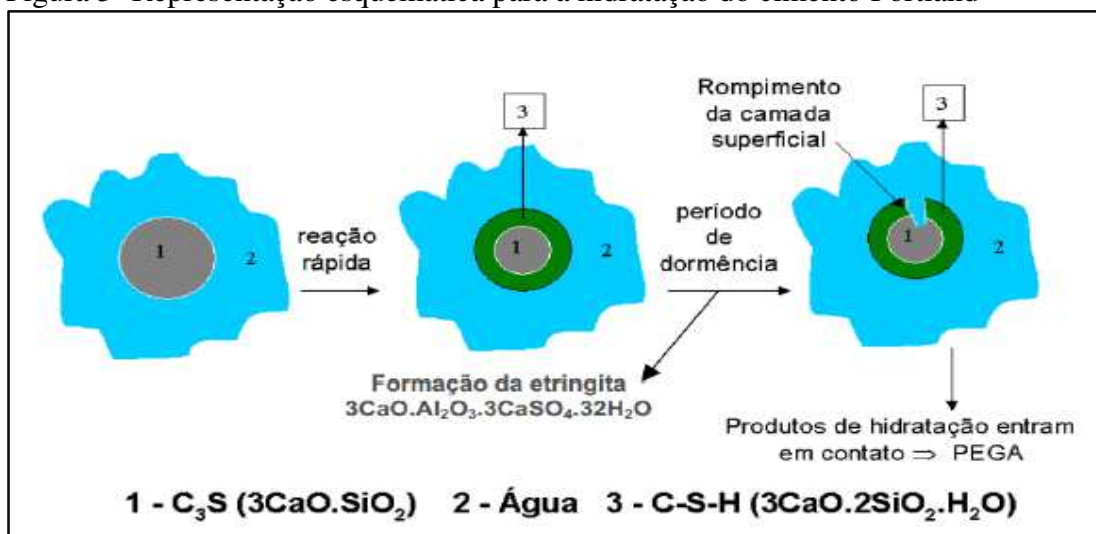
Figura 2- Esquema de E/ S em matriz de cimento portland



FONTE: Conner(1990)

Pela Figura 2 podemos perceber que o óxido de mercúrio e os sais de Bário continuam na superfície da partícula de cimento, pois com a elevação do pH os cátions de bário ( $\text{Ba}_2^+$ ) e mercúrio ( $\text{Hg}_2^+$ ) são convertidos para a forma de óxido ( $\text{HgO}$ ) e carbonatos insolúveis ( $\text{BaSO}_4$  e  $\text{BaCO}_3$ ). A figura mostra esse processo de incorporação, o cromo ( $\text{Cr}_3^+$ ) pode ser incorporado no interior do composto, especialmente no interior do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que apresenta a fórmula molecular  $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . O chumbo ( $\text{Pb}_2^+$ ), cádmio ( $\text{Cd}_2^+$ ) e zinco ( $\text{Zn}_2^+$ ) são incorporados na zona de superfície do composto hidratado. A Figura 3 representa as principais etapas de hidratação do cimento Portland.

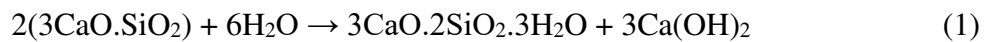
Figura 3- Representação esquemática para a hidratação do cimento Portland



FONTE: Melchert(2012)

Primeiramente os silicatos  $C_3S$  e  $C_2S$  entram em contato com a água iniciando a formação de uma camada de C-S-H e hidróxido de cálcio  $Ca(OH)_2$ , sendo a última de ocorrência mais lenta. As reações de hidratação estão descritas na Equação 1 e 2 (MELCHERT, 2012).

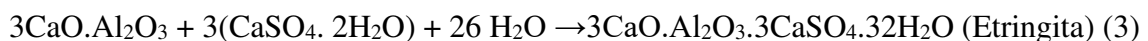
Reação de hidratação do  $C_3S$  Equação 1:



Reação de hidratação do  $C_2S$  Equação 2:

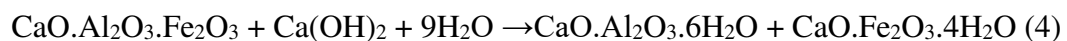


Com o aumento da concentração dos íons de  $Ca^+$  e  $OH^-$ , começa a formação da etringita, ocasionada entre os íons citados com  $SO_4^{2-}$  e  $AlO_3^{3-}$  (presentes no  $C_3A$ ) que precipitam na superfície das partículas de cimento não hidratadas, gerando liberação de calor nessa fase. A reação de hidratação do  $C_3A$  é descrita na Equação 3 (BREHM, 2004).



Passada à primeira hora após a mistura da água com o cimento a taxa de hidratação cai significativamente, devido à camada de gel que envolve os grãos anidros oriundos do processo de precipitação inicial da etringita. Esse período é denominado de dormência (BREHM, 2004).

No seguimento com o processo de nucleação dos cristais a concentração dos aluminatos se aumenta novamente e as reações de hidratação são retomadas com destaque para hidratação da fase  $C_4AF$ , Equação 4 (RIBEIRO; YUAN; MORELLI, 2011).



Os principais produtos formados nesse processo de hidratação para o cimento do tipo Portland são:

- ✓ Hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) ou CH: também conhecido como Portlandita, que representa a 25% do volume de sólidos na pasta endurecida. Em elevadas dosagens o hidróxido de cálcio implica em uma menor resistência a sulfatos.
- ✓ Silicato de cálcio hidratado ( $3CaO.SiO_2.3H_2O$ ) ou C-S-H: confere 50-60% do volume de sólidos do cimento Portland completamente hidratado. Sua principal contribuição está ligada a resistência mecânica.

- ✓ Sulfoaluminatos de cálcio ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) ou  $\text{C}_6\text{ASH}_{32}$ : Também conhecido como etringita constituem de 15 a 20% do volume de sólidos na pasta. Sua formação contribui na pega do cimento e na resistência mecânica.
- ✓ Outros compostos sólidos estão em concentrações menores que 10% as quais não apresentam influencia significativamente nas propriedades do cimento Portland, devido a sua formação acontecer de forma minoritária (NEVILLE, 1997).

Segundo Isaia (2011), além dos fundamentais produtos originados no processo de hidratação, percebe-se a carbonatação como reação frequente nas estruturas do cimento Portland. A reação de carbonatação está ligada à atividade do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico nas superfícies expostas das estruturas cimentícias, de maneira que o mecanismo do processo tem como uma de suas etapas a dissolução do dióxido de carbono na superfície dos poros do cimento, essa etapa ocorre de forma lenta uma vez que a permeabilidade do  $\text{CO}_2$  é reduzida à proporção que a porosidade superficial diminui tendo em vista a colmatção dos poros, processo ocorre na Equação 5.



Simultaneamente, íons  $\text{OH}^-$  e  $\text{Ca}^{2+}$  vão sendo gerados na solução do poro, principalmente originados da dissolução do hidróxido de cálcio, conforme se vê na Equação 6; todavia eles podem ser decorrentes da decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e das fases aluminato.



Numa etapa posterior, completando o processo, o  $\text{CO}_3^{2-}$  reage com o  $\text{Ca}^{2+}$ , formando o carbonato de cálcio, segundo Equação 7.



No caso apresentado anteriormente, tem-se a carbonatação do hidróxido de cálcio, entretanto, essa reação pode ocorrer tanto para a estrutura do C-S-H quanto para as fases de aluminatos. A primordial alteração ocasionada nas estruturas cimentícias decorrente nesse processo, está relacionada a diminuição da porosidade total, fator que pode elevar valores de resistência à compressão com base no avanço das idades de hidratação (ISAIA, 2011).

### 2.5.1. Classificação do Processo de Estabilização por Solidificação

Para Brito e Soares (2009) o processo de imobilização de resíduo pode ser realizado através de mecanismo físico, químico ou combinação de ambos. Quando se trata de estabilização física ocorre mudança em sua forma física, porém não são todos os casos que causam ligação química dos constituintes do resíduo. A estabilização por solidificação (E/S) química altera a forma química dos constituintes do resíduo, gerando formas menos solúveis em água.

A E/S pode ser separada em processos orgânicos e inorgânicos, os orgânicos têm como base de ligantes os polímeros termoplásticos e termofixantes, enquanto que os inorgânicos são formados com ligantes como cimento e material pozolânico, sendo em geral mais vantajoso devido ao custo e a facilidade de aplicação (SILVA, 2007).

Segundo Wiles (1987) a E/S também pode ser classificada em função do local onde o processo é realizado, dividindo-se em, *in situ* (os aglomerantes são colocados diretamente nas lagoas ou por meio de injeção de materiais solidificados ou estabilizados no subsolo); *mobile plant* (realizado em equipamento móvel ou de fácil transporte de um local para outro); *in plant* (executado em uma planta de tratamento projetada especificamente para solidificar e estabilizar quantidade de volume de resíduo estabelecida previamente) e *in drum* (Os resíduos são colocados em recipientes plásticos, nos quais são misturados agentes solidificantes, que após o tempo de cura estabelecido são dispostos em aterro ou no próprio recipiente plástico).

### 2.5.2. Cimento Portland como Aglutinante

Os processos de E/S em sua maioria utilizam cimento *Portland* constituindo um sólido granular ou monolítico que incorporam o material residual e imobiliza os contaminantes, garantindo uma mobilidade e conseqüentemente aumentando a resistência física do resíduo. As matrizes são formadas por cimento Portland Comum e material pozolânico, ou pela combinação de ambos, em virtude da sua serventia a uma variedade de resíduos, estes são os materiais mais escolhidos atualmente nas indústrias que utilizam E/S (SILVA 2007).

No Brasil existia apenas um tipo de cimento *Portland*, com o desenvolvimento dos conhecimentos técnicos foram surgindo outros tipos com aplicabilidade de uso geral ou com propriedades específicas para formação de concretos, argamassa com a resistência e durabilidade desejada. Todos os cimentos *Portland* são formados a partir de clínquer e

adições, sendo o clínquer a base principal, composto por calcário e argila, estando presente em todos. O que diferem e classificam cada tipo de cimento *Portland* são os diversos tipos de adições como gesso, escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos (Associação Brasileira de Cimento *Portland*, 2010).

Os cimentos mais usados são: Cimento *Portland* comum, Cimento *Portland* composto, Cimento *Portland* de alto-forno, Cimento *Portland* pozolânico, os quais são designados pela sigla e classe de resistência. Na Tabela 2 está descrita a Nomenclatura dos cimentos *Portland* atualmente de acordo com a Associação Brasileira de Cimento *Portland*, 2010.

Tabela 2- Nomenclatura atual dos Cimentos *Portland*

Nome técnico		Sigla	Classe	Identificação do tipo e classe
Cimento portland comum (NBR 5732)	Cimento portland comum	CP I	25	CP I -25
			32	CP I -32
			40	CP I -40
	Cimento portland comum com adição	CP I-S	25	CP I -S-25
			32	CP I -S-32
			40	CP I -S-40
Cimento portland composto (NBR 11578)	Cimento portland composto com escória	CP II-E	25	CP II-E -25
			32	CP II-E -32
			40	CP II-E -40
	Cimento portland composto com pozolana	CP II-Z	25	CP II-Z -25
			32	CP II-Z -32
			40	CP II-Z -40
	Cimento portland composto com filer	CP II-F	25	CP II-F - 25
			32	CP II-F -32
			40	CP II-F -40
Cimento portland de alto – forno		CP III	25	CP II -25
			32	CP II -32
			40	CP II -40
Cimento Portland pozolânico (NBR 5736)		CP V	25	CP V – 25
			32	CP V – 25
Cimento portland de alta resistência inicial (NBR 5733)		CP V – ARI	-	CP II – ARI
Cimento Portland resistente aos sulfatos (NBR 5737)		-	25 32 40	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS.
Cimento Portland de baixo calor de hidratação (NBR 13116)		-	25 32 40	Sigla e classe dos tipos originais



			acrescidos do sufixo BCx	
Cimento Portland branco (NBR 12989)	Cimento Portland branco estrutural	CPB	25 32 40	CPB – 25 CPB – 32 CPB – 40
	Cimento Portland branco não estrutural	CPB	-	CPB
Cimento para poços petrolíferos		CPP	G	CPP – Classe G

FONTE: Associação Brasileira de Cimento Portland (2010).

A nomenclatura dos cimentos se dão em função do tipo de cimento, da classe de resistência a qual pode ser de 25, 32 e 40, valores estes referentes o mínimo de resistência após 28 dias de acordo com o fabricante. A partir dessas informações tem-se que a classificação do cimento se dar pelo prefixo CP seguido de algoritmos romanos I, II, III, IV e V. Toda via a escolha do cimento se dará em função do produto que deseja formar. Nesta pesquisa utilizou-se o cimento CP II – Z 32.

### 2.5.3. Critérios para avaliação do processo de estabilização por solidificação

Na opinião de Brito e Soares (2009) dois critérios são importantes quando se trata de E/S, a integridade/durabilidade dos materiais e a imobilização dos contaminantes. Que estão relacionados respectivamente as análises de resistência a compressão, capacidade de absorção de água, umidificação/secagem; lixiviação e solubilização.

#### 2.5.3.1 Ensaios de Integridade/ Durabilidade

Rojas *et al.* (2009) afirmam que o ensaio de resistência a compressão (RC) é adotado para averiguar a capacidade da amostra em resistir a diferentes cargas de compressão mecânica. De posse dos resultados desse ensaio é possível certificar a integridade do material E/S, na etapa de disposição final do material tratado, pois os materiais devem ter resistência para aguentar elevadas cargas colocadas sobre eles.

Para produzir matriz sólida com propriedades desejadas, existem fatores que influenciam no produto final tais como: período de tempo de cura (dias), que determina uma taxa significativa de resistência a compressão; e tipo de cura (ar livre, na água ou

câmara úmida) que analisa a importância do meio ambiente sobre o material estabilizado e solidificado (ROCHA, GADELHA E BRITO, 2010).

Segundo Sales e Filho (2014) em tempo de cura inferior a 3 dias, as matrizes que tem cimento Portland substituído por pó de resíduo cerâmico apresentaram resistência a compressão abaixo da mistura de referência, ocasionando diminuição da resistência com o aumento da porcentagem de resíduo. No período de cura de 28 dias, quando substituído 10% e 40% de cimento Portland pelo resíduo promoveu-se reduções de 11,4% e 16,9% da resistência a compressão em relação a do concreto de referência. Já para a substituição de 20% de cimento por resíduo notou-se um acréscimo de 11,1% na resistência a compressão.

Brito (2007) as aplicações dos blocos produzidos com adição de resíduo de acordo com sua RC podem ser usadas como: Material para realização de obras de alvenaria sem função estrutural, como material de cobertura pavimentação em obras de rodovias, uso em cerâmica vermelha (tijolos maciços, blocos cerâmicos e telha) e fabricação de artefatos de concreto. Da mesma forma o mesmo pode ser disposto em aterro sanitário industrial, em uma célula especial (mono-disposição) ou em codisposição com resíduos sólidos urbanos.

Lisboa *et.al* (2012) notou que a resistência a compressão diminuiu quando aumentou a quantidade de resíduo na formação da argamassa. Mesmo assim para os corpos de prova com ensaio de 28 dias os valores foram admitidos perante as exigências mecânicas e reológica requeridas pela ABNT-NBR 13281.

Campos (2011) em sua pesquisa afirma que os valores encontrados para as resistências aos 28 dias foram maiores em relação aos 7 dias, devido as etapas de hidratação do cimento. Analisando os resultados expostos, houve um aumento de aproximadamente 10,6% ao relacionar o traço de referência nas idades de 7 e 28 dias. Com a incorporação de 25% de resíduo, o acréscimo de resistência foi de 19,7% em relação às misturas com mesmas idades e para as misturas contendo 50% de substituição o aumento chegou a 26,87%. O autor justifica o aumento na resistência ser a atividade pozolânica presente no resíduo, ocorreu uma melhora contínua da resistência de acordo com a idade e o teor de porcelana adicionado.

Ivanov (2014) estudou a incorporação de dicromato de potássio -  $K_2Cr_2O_7$  com porcentagens de 0,5%, 1% e 2% a argamassas, utilizando o cimento fondu e um tempo de cura de 28 dias, após esse período foi realizado teste de resistência a compressão. Em

seu trabalho a resistência variou de 13MPa para 25% de resíduo a 30MPa para 0% de resíduo.

Oliveira (2014) efetuou ensaios de resistência a compressão com variações de 0, 10, 20 e 30% de teor de resíduo. Os corpos de provas rompidos aos 7 dias de cura apresentaram resistência média de 13,15 MPa; 12,10 MPa; 11,25 MPa; e 9,54 MPa, respectivamente. Aos 28 dias os corpos de provas rompidos alcançaram resistências de 25,78 MPa; 23,91 MPa; 24,23 MPa; e 21,07 MPa, respectivamente. O estudo que o incremento da resistência para os concretos com teores de substituição de cimento por resíduo cerâmico foi maior, no entanto não foi suficiente para superar a resistência do concreto sem substituição.

Silva *et.al* (2017) em seu estudo averigou que o corpo de prova sem resíduo cinza apresentou resistência média à compressão de 49,0 MPa, já os traços com 25%, 50% e 75% de substituição, quando comparados ao traço de 0% de substituição de resíduo cinza (referência), apresentaram um incremento de 8,16%, 4,1%, 4,1% e 2,1% respectivamente.

Araújo (2017) apresenta os resultados de resistência à compressão das argamassas geopoliméricas após um período de 28 dias de cura. Na maior parte dos casos, apresentaram comportamento diferenciados dependendo dos teores de resíduo de demolição e construção e de silicato. O corpo com maior quantidade de silicato e toda areia substituída por resíduo, foi a que mostrou o melhor desempenho, sendo superior a amostra de referência, indicando que a presença do silicato de sódio sobrepôs ocasionais efeitos negativos causados pela presença dos resíduos.

Segundo Almeida (2017) a substituição de 10% de cimento e 30% de areia por rejeito de caulim, acarretou em uma queda na Resistencia a compressão, com 21 MPa a 28 dias frente a 35 MPa na mistura sem rejeito.

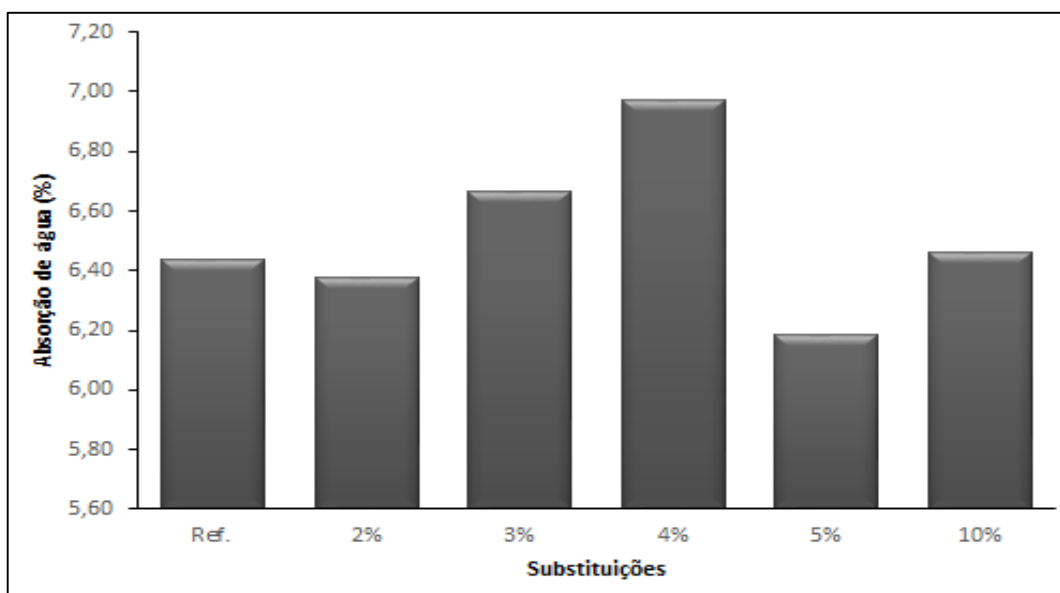
Nos ensaios de capacidade de absorção de água o objetivo é determinar a quantidade de água presente nos poros de um material sólido, relacionando a porosidade dos materiais e a influência nos ensaios de resistência a compressão e lixiviação (SPENCE e SHI, 2005). O aumento da absorção de água diminui a resistência e consequentemente aumenta a lixiviação. No Brasil, utiliza-se a norma da ABNT NBR 9778 para avaliar produtos estabilizados por solidificação (ROCHA *et.al* 2010).

As matrizes tiveram um aumento na capacidade de absorção de água a medida que elevou a quantidade de resíduo incorporada a argamassa, mostrando que com mais resíduo a porosidade nas matrizes se tornam maior. Podendo ser observada a mesma

relação quando estudado os valores dos índices de vazios das amostras. Como a adição de resíduo forma um material com capacidade de absorção de água maior, esses são usados em argamassas que apresentam essa função (LISBOA *et.al* 2012). Em corpos que tem como base cimento, hidróxido de cálcio, bentonitas e argilas organofílicas, a capacidade de absorção de água aumenta favorecendo a lixiviação.

Sgorlon *et. al* (2017) confeccionou blocos de concreto, substituindo areia por resíduo sólido de galvanoplastial (composto em sua maioria por óxido de magnésio). As formulações foram com substituição de 2%, 3%, 4%, 5% e 10% de resíduo. Em sua pesquisa foi estudada a capacidade de absorção de água para os blocos com tempo de cura de 28 dias. Na Figura 4 temos a média dos resultados de absorção de água.

Figura 4- Absorção de água dos blocos de concreto fabricados com o resíduo.



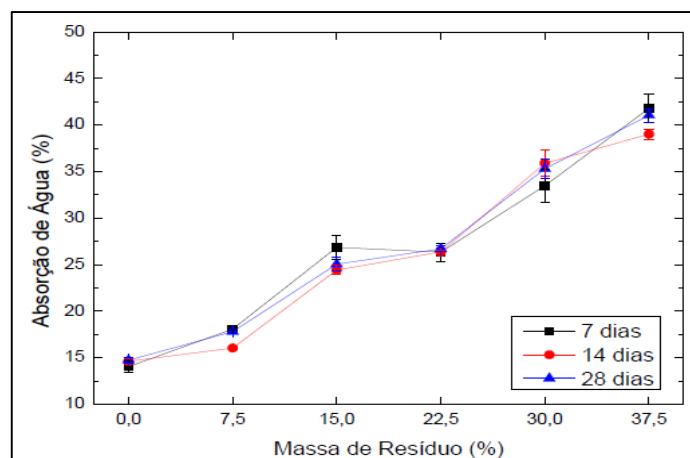
FONTE: Sgorlon *et. al* (2017)

Sgorlon *et. al* (2017) por meio da Figura 4 observaram que os valores médios de absorção de água dos blocos foram levemente superior a 6%. Visto que na incorporação de 4%, foi o pico de maior absorção de água. A análise de variância (ANOVA), apresentou um P valor de 0,2065 (Pvalor > 0,01), ou seja, não houve diferença significativa entre as médias dos ensaios. Dessa forma foi possível afirmar que a incorporação de até 10% de resíduo na fabricação dos blocos de concreto não altera a propriedade física de absorção de água das peças.

Oliveira (2017) substituiu areia por 0% a 37,5% de fibra de vidro, variando o tempo de cura em 7,14 e 28 dias, em sua pesquisa fica comprovado que o índice de vazios cresce linearmente, a medida que aumenta a quantidade de resíduo presente na argamassa,

como mostra a Figura 5. O autor afirma que esse fato pode ser explicado pelo fato do resíduo apresentar pouca afinidade com a água.

Figura 5- Absorção de água dos corpos de prova em relação à porcentagem de resíduos



FONTE: Oliveira (2017)

Santos (2017) adicionou sedimento a uma argila, nas proporções de 10, 20, 30 e 40% em massa, formulou corpos de prova, estudou a capacidade de absorção de água dos mesmo de acordo com os resultados, percebeu que os corpos de prova com incremento maior que 10% em massa do SCP, formulações MR20, MR30 e MR40, tiveram maior absorção de água. Resultados maiores que 10% em massa do sedimento na massa argilosa geram maiores valores de absorção, sendo justificado pelo caráter predominante caulínítico do sedimento e à elevada perda de massa na queima, face ao alto teor de argilominerais e pela volatilização da matéria orgânica existente no sedimento, aumentando a porosidade aberta das peças cerâmicas.

#### 2.5.3.2. Imobilização dos contaminantes

A estabilização por solidificação apresenta mecanismos que inibem a dispersão dos contaminantes, modificando a solubilidade por controlar o pH, formando combinações químicas insolúveis e o encapsulamento dos contaminantes. Esses fatos são determinados através dos testes de lixiviação e solubilização.

Segundo Mesquita (2008), a estabilização acontece quando ocorrem alterações no meio físico gerando uma matriz de baixa permeabilidade, e no químico gerando alta alcalinidade, permitindo a transformação de metais pesados em compostos insolúveis.

A ABNT NBR 10.005 define lixiviação como “processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo

sólido, por meio de dissolução no meio extrator”. O teste de lixiviação consiste em analisar a reatividade do resíduo, que pode provocar, direta ou indiretamente a contaminação do meio ambiente.

O processo de solubilização pode ser definido como a quebra de interações interiônicas ou intermoleculares no soluto, que envolve a separação de moléculas do solvente, fornecendo espaço no solvente para interação com o soluto (ALMEIDA, 2009).

Os pesquisadores Santos (2013) e Caetano (2016) realizam análise ambiental em resíduo industrial o qual foi incorporando a matriz de cimento formando blocos intertravados.

Santos (2013) adicionou o resíduo pó de despoeiramento da produção de liga de manganês (PFM) a corpos cerâmicos com o objetivo de dispor de forma adequada para isso realizou teste de lixiviação e solubilização, inicialmente foi classificado o resíduo como classe II-A, não perigoso e não inertes com teores de Mn e Pb no extrato solubilizado superiores ao limite estabelecido pela ABNT NBR10004/2004.

Corpos cerâmicos com 10% de PFM foram classificados como material não perigoso e inerte, Classe II-B, não apresentando risco ao meio ambiente, embora o PFM tenha sido classificado com base no Decreto N° 8464/76. Corpos com 20% de PFM foram classificados com classe II-A, não perigoso e não inerte por apresentarem teor de Mn no extrato solubilizado superior ao estabelecido na ABNT NBR 100006/2004. Já com os resultados de lixiviação todas as formulações estudadas tiveram teores lixiviados significativamente menores comparados com o resíduo PFM. Os corpos, cuja composição incorpora 10% de PFM, apresentou teor de extrato de Mn lixiviado abaixo do limite especificado, enquanto os corpos cuja composição incorpora 20% de PFM tiveram valores superiores ao limite estabelecido de lançamento de efluente (SANTOS,2013).

Caetano (2016) em sua pesquisa verificou o potencial poluidor do resíduo da Shredder o qual foi encapsulado em matriz de cimento gerando bloco de concreto para pavimentação que posteriormente foram analisados a partir do ensaio de solubilização. Inicialmente o resíduo foi classificado como Classe II A – não perigoso e não inerte. Após o processo de solidificação/estabilização, ele afirma que apenas três dos oito elementos nocivos encontrados no resíduo apresentaram resultados acima do limite máximo exigido pela norma para o extrato solubilizado.

O Alumínio diminuiu em 63,5% e a concentração dos fenóis totais diminuiu em 90%, porém ainda não atingiram a concentração estabelecida pela norma. Para o cádmio não houve encapsulamento, a sua concentração se manteve praticamente a mesma. Os

outros elementos como ferro total, fluoretos, manganês, selênio e surfactantes foram estabilizados de forma eficiente e suas concentrações não ultrapassaram os limites da norma(CAETANO,2016).

Caetano (2016) em seu trabalho também apresenta elementos que antes não apareceram no resultado de solubilização do resíduo *in natura*, passaram a aparecer no resultado de solubilização dos blocos para pavimentação. Em razão disto, o autor realizou a solubilização nas peças de concreto produzidas pela fábrica que utiliza materiais convencionais. Dessa forma constatou que os elementos chumbo e bário aparecerem no resultado do ensaio de solubilização para as peças de concreto convencionais e também se verificou a presença do elemento cádmio.

Ferreira (2013) em seu trabalho incorpora o resíduo Pedra Sabão (PS) e Escória de ferro-ligas de Manganês(ESC) a corpos de provas cujo tempo de cura é de 28 e 60 dias, após o período de cura o autor realizou ensaios de solubilização e lixiviação. Para o ensaio de lixiviação foi analisado os elementos As, Ba, Cd, Cr, Pb e Mn. Na Tabela 3, 4 e 5 esta apresentado respectivamente o resultado de lixiviação e solubilização por ele encontrado.

Tabela 3- Teor dos elementos analisados na lixíviação e concentração – limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação para classificação de resíduos sólidos

Elementos	Parâmetros Analisados					
	As (mg/L)	Ba (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Pb (mg/L)	Mn (mg/L)
Limite máximo na lixívia ABNT NBR 10004 (mg/L)	1,0	70,0	0,5	5,0	1,0	Não consta no anexo normativo
LIXPS28	< 0,004	0,085	< 0,009	0,061	< 0,026	< 0,001
LIXPS60	< 0,004	0,093	< 0,009	0,058	< 0,026	< 0,001
LIXESC60	< 0,004	0,199	< 0,009	0,047	< 0,026	5,870

FONTE: Ferreira(2013)

LEGENDA: LIXPS28: Solo-cal-PS25 lixiviado após 28 dias de cura; LIXPS60: Solo-cal-PS25 lixiviado após 60 dias de cura; LIXESC60: Solo-cal-ESC25 lixiviado após 60 dias de cura.

Tabela 4- Teor dos elementos no solubilizado e concentração – limite máximo no extrato obtido no ensaio de solubilização para classificação de resíduos sólidos

Elementos	Parâmetros Analisados					
	Al (mg/L)	As (mg/L)	Ba (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Cu (mg/L)
Limite máximo no solubilizado ABNT NBR 10004 (mg/L)	0,2	0,01	0,07	0,005	0,05	2,0
SOLPS28	0,14	< 0,040	< 0,001	< 0,009	0,020	< 0,007
SOLPS60	0,09	< 0,040	< 0,001	< 0,009	0,024	< 0,007
SOLESC60	0,18	< 0,040	< 0,001	< 0,009	0,022	< 0,007

FONTE: Ferreira (2013)

LEGENDA: SOLPS28: Solo-cal-PS25 solubilizado após 28 dias de cura; SOLPS60: Solo-cal-PS25 solubilizado após dias de cura; SOLESC60: Solo-cal-ESC25 solubilizado após dias de cura.

Tabela 5- Teor dos elementos no solubilizado e concentração – limite máximo no extrato obtido no ensaio de solubilização para classificação de resíduos sólidos

Elementos	Parâmetros Analisados				
	Fe (mg/L)	Na (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	Mn (mg/L)
Limite máximo no solubilizado ABNT NBR 10004 (mg/L)	0,3	200,0	0,01	5,0	0,01
SOLPS28	0,981	0,343	< 0,026	< 0,003	< 0,001
SOLPS60	1,075	0,352	< 0,026	< 0,003	< 0,001
SOLESC60	1,399	0,372	< 0,026	< 0,003	< 0,001

FONTE: Ferreira (2013)

LEGENDA: SOLPS28: Solo-cal-PS25 solubilizado após 28 dias de cura; SOLPS60: Solo-cal-PS25 solubilizado após dias de cura; SOLESC60: Solo-cal-ESC25 solubilizado após dias de cura.

Em relação a Tabela 3 todos os metais estavam de acordo com a ABNT NBR 10004/ 2004. Na tabela 4 e 5 os resultados apresentados mostraram que os teores dos elementos Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Na, Pb, Zn e Mn ficaram dentro dos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 10004:2004. Com base na legislação os corpos de provas foram classificados como resíduos Classe II A – Não inertes, ou seja, resíduos não perigosos e não inertes (FERREIA,2013).

Ivanov (2014) analisou a incorporação de dicromato de potássio -  $K_2Cr_2O_7$  de 0,5%, 1% e 2% a argamassas com cimento fondu. Na Tabela 6 tem-se os resultados de lixiviação do metal cromo (VI) e cromo (total) com 28 dias de hidratação.



Tabela 6- Dados ensaio lixiviação do cimento Fondu com 28 dias de hidratação

Concentração (K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	Concentração lixiviada (mg/L)	
	Cr (VI)	Cr (total)
0,5%	<0,05	1,8
1,0%	0,1	2,9
2,5%	1,1	7,7

FONTE: Inanov(2014)

A partir da Tabela 6, o autor observou que o aumento da concentração de dicromato de potássio, acarreta em um aumento na lixiviação de cromo.

Ueda et.al (2017) estudaram a lixiviação do cromo e do alumínio presente em corpos de provas composto por frações de 0,5 a 2,0% de lodo de curtume, o qual recebeu um tratamento prévio de clarificação química utilizando os coagulantes PG $\alpha$ 21Ca e sulfato de alumínio para comparação da eficiência. São apresentados na tabela 7 e 8, os resultados de lixiviação em que ilustram a diferença entre o uso dos dois coagulantes.

Tabela 7- Concentração de metais nos lixiviados das matrizes de argamassa contendo lodo seco do tratamento de efluente de curtume com o coagulante sulfato de alumínio

Proporção de lodo seco na matriz (%)	Cromo total (mg/L)	Alumínio (mg/L)
0	-	-
0,5	0,23	0,00
1,0	0,38	0,21
2,0	0,64	0,33

FONTE: Ueda (2017)

Tabela 8- Concentração de metais nos lixiviados das matrizes de argamassa contendo lodo seco do tratamento de efluente de curtume com o coagulante PG $\alpha$ 21Ca

Proporção de lodo seco na matriz (%)	Cromo total (mg/L)	Alumínio (mg/L)
0	-	-
0,5	0,13	0
1,0	0,07	0
2,0	0,03	0

FONTE:Ueda (2017)

Ueda(2017) comprovou que quanto mais adiciona lodo à argamassa, maior será a lixiviação do cromo; resultados demonstrados na tabela 7, em que as matrizes de

argamassa contem lodo seco do tratamento de efluente de curtume com o coagulante sulfato de alumínio. Já de acordo com a tabela 8 um resultado diferente ao da tabela 7, pois quanto maior a quantidade de lodo seco do tratamento de efluente de curtume com o coagulante PG $\alpha$ 21Ca adicionado à argamassa, menor foi a lixiviação do cromo.

Sgorlon *et.al* (2017) realizou ensaios de Lixiviação e solubilização a concentração dos contaminantes presentes no extrato lixiviado dos blocos fabricados com o resíduo industrial, aos 28 dias de cura, estão listados na Tabela 9.

Tabela 9- Concentração de contaminantes presentes no extrato lixiviado dos blocos fabricados com resíduo aos 28 dias de cura.

Contaminante	Limite NBR 10004/2004 (mgL-1)	Ref.*	2%*	3%*	4%*	5%*	10%*
Ba	70,00	9,19	8,83	9,76	14,38	17,82	17,25
Cd	0,50	0,05	0,03	0,07	0,04	0,03	0,04
Pb	1,00	0,36	0,36	0,28	0,41	0,29	0,51
Cr	5,00	0,15	0,17	0,18	0,21	0,21	0,24
Hg	0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Ag	5,00	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Fluoreto (F)	150	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

FONTE: Sgorlon (2017)

LEGENDA: Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do aparelho utilizado n.d: não detectado pelo cromatógrafo de íons. \* Resultados com desvio padrão menor que 0,01.

Por meio dos resultados apresentados, Sgorlon *et.al* (2017), observou que em todas as porcentagens de substituição de agregado miúdo por resíduo, não houve influência significativa na concentração dos contaminantes no extrato lixiviado dos blocos confeccionados, quando comparados aos resultados apresentados pelo bloco referência (sem a adição de resíduo). Ainda com base nos valores apresentados na Tabela 9, foi determinado que os blocos fabricados, podem ser classificado como Classe II – não perigoso. Na Tabela 10 são apresentados os contaminantes presentes no extrato solubilizado dos blocos fabricados com o resíduo industrial aos 28 dias de cura.

Tabela 10- Concentração de contaminantes presentes no extrato solubilizado dos blocos fabricados com resíduo aos 28 dias de cura

Contaminante	Limite NBR 10004/2004 (mg/L)	Ref.*	2%*	3%*	4%*	5%*	10%*
Al	0,20	0,91	0,65	0,75	0,35	0,26	0,17
Ba	0,70	8,30	10,92	13,60	9,45	12,67	15,69
Cd	0,005	0,04	0,04	0,06	0,05	0,05	0,042
Pb	0,01	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Cu	2,00	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Cr	0,05	0,19	0,15	0,19	0,16	0,22	0,20
Fe	0,30	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06
Mn	0,10	0,85	0,74	0,77	1,05	0,98	0,91
Hg	0,001	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Ag	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Na	200	40,21	40,39	40,34	40,49	43,01	41,33
Cloreto(Cl <sup>-</sup> )	250	1,15	1,30	1,42	n.d	1,39	n.d
Fluoreto(F <sup>-</sup> )	1,50	0,26	0,25	0,35	0,18	0,27	0,19
Nitrato(NO <sup>3-</sup> )	10,00	5,37	2,90	1,96	2,74	3,78	6,82
Sulfato(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	250	30,26	30,45	54,02	39,33	35,54	30,63

FONTE: Sgorlon (2017)

LEGENDA: Os valores indicados por < (menor que) estão abaixo do limite de detecção do aparelho utilizado. \* Resultados com desvio padrão menor que 0,01

Sgorlon *et.al* (2017), destacam que somente o bário (Ba) teve resultados negativos, não apresentando retenção. Tal fato pode estar relacionado a concentração de bário encontrada no cimento, pois, no extrato lixiviado do mesmo já existia grande concentração deste contaminante, o que pode ter causado interferências na eficiência de retenção.

## 2.6. EFEITO DO CROMO NO MEIO AMBIENTE E NA ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO

A maioria dos elementos químicos estão envolvida em ciclos fechados na natureza, em concentrações que não causam danos aos organismos. Todavia, a introdução de substâncias químicas pode ocasionar a bioacumulação na cadeia alimentar, nos ambientes aquáticos e terrestres, onde a exposição crônica de metais pesados resulta em disfunções imunológicas (SOUZA,2016).

Tsutiya (1999) define que “o termo ‘metais pesados’ é utilizado para elementos químicos que contaminam o meio ambiente, que provocam diferentes danos à biota, quais sejam, metais, semi-metais e mesmo não metais como, por exemplo, o selênio.”

Alguns metais como o cobre, ferro, manganês, níquel e zinco são necessários para o desenvolvimento de todos os organismos vivos, mas desde que seja em pequena quantidade, pois em grande quantidade são tóxicos. Metais como o alumínio, cádmio, chumbo e mercúrio não possuem funções metabólicas e podem causar várias distúrbios nos seres vivos. A contaminação ambiental por metais pesados ocorre, na maioria dos casos, por via antrópica, ou seja, através de resíduos industriais descartados sem tratamento (NOVAIS,2000; AZEVEDO,2005).

Laboratórios de ensino, pesquisa e prestação de serviços se encaixam no grupo de geradores de resíduos contendo metais pesados e podendo se tornar poluidores se o tratamento e descarte desses resíduos não forem realizados, mesmo que em pequenas quantidades podem gerar em longo prazo contaminações com teores elevados desses metais nos diversos compartimentos ambientais (ABREU, 2002).

De acordo com Campos (2011), os metais são classificados em: (i) elementos essenciais: sódio, potássio, cálcio, ferro, zinco, cobre, níquel e magnésio; (ii) micro contaminantes ambientais: arsênio, chumbo, cádmio, mercúrio, alumínio, titânio, estanho e tungstênio; (iii) elementos essenciais e simultaneamente micro contaminantes: cromo, zinco, ferro, cobalto, manganês e níquel.

O cromo é um metal de transição na tabela periódica, e está localizado no sexto grupo e quarto período (configuração [Ar] 3d<sup>5</sup>4s<sup>1</sup>). Apresenta cor brilhante, prateado metálico. É um material duro e muito resistente a corrosão. Em temperatura ambiente, não se oxida facilmente. Sua massa atômica é 52u e seu número atômico é 24. Apresenta ponto de fusão e ebulição muito elevado, na faixa entre 2163 K e 2755 K (OHLWEILER, 1973).

A toxicidade do cromo está relacionada a espécie química e seus efeitos estão associados à forma química e exposição. O cromo possui diversos estados de oxidação, os quais podem variar de -2 a +6. Em soluções aquosas as espécies estáveis estão sob as formas de Cr (III) e Cr (VI), essas são caracterizadas por diferentes propriedades físico-químicas, reatividade química e bioquímica. O cromo (III) é essencial para manutenção da taxa normal de glicose em animais inclusive o homem, já o cromo (VI) apresenta efeitos tóxicos e propriedades carcinogênicas (KOTÁS e STASICKA, 2000).

Porém, Barrera *et.al* (2008) afirma que todas as formas de cromo podem ser tóxicas em grandes concentrações, sendo a hexavalente 100 vezes mais tóxico e 1000 vezes mais mutagênico que o trivalente e a tetravalente devido a capacidade adentrar nas células, pois existe como ânion cromato tetraédrico em pH fisiológico, sendo semelhante a outros ânions naturais como sulfato e fosfato, permeáveis através dos canais da membrana celular (BARRERA et al., 2008).

A toxicidade do cromo hexavalente ocorre devido a da alta solubilidade e mobilidade em água. Já o cromo trivalente, em condições ambientes, é relativamente estático e seus óxidos e hidróxidos, são caracterizados por produtos de baixa solubilidade (MOHAN et al., 2005). Dentro das células o cromo (VI) sofre redução a cromo (III), envolvendo espécies intracelulares na redução (ascorbato, a glutatona ou os aminoácidos), passando pelas formas intermediárias de cromo (V), (IV). Sendo os radicais livres gerados nessa redução os responsáveis pelos efeitos carcinogênicos (OMS, 1998).

O modo como o cromo hexavalente pode existir em solução aquosa ou em águas contaminadas depende das características desta solução e principalmente do pH, podendo estar presente sob as formas neutras e aniônicas de dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ), hidrogeno cromato ( $\text{HCrO}_4^-$ ), cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ), além do ácido crômico. O pH tem relação direta com os mecanismos de adsorção dos íons na superfície do sólido e nas formas em que o cromo é encontrado na solução aquosa (UMESH *et al.*, 2007). Em pH baixo, só existe ácido crômico, enquanto que o  $\text{HCrO}_4^-$  é predominante na faixa de pH de 1 a 6 e prevalece a espécie  $\text{CrO}_4^{2-}$  em pH acima de 6, mas pode ocorrer de as espécies coexistirem (BENHAMMOU et al., 2007).

## CAPÍTULO 03

### 3. METODOLOGIA

A presente pesquisa foi realizada no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos – LABGER, pertencente a Unidade Acadêmica de Engenharia Química - UAEQ, localizada na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, no Centro de Ciências e Tecnologia - CCT, da cidade de Campina Grande, no Estado da Paraíba, Brasil.

Na pesquisa foram utilizados os materiais relacionados a seguir:

✓ Equipamentos, vidrarias e reagentes:

- Agitador magnético;
- Agitador rotatório de frascos;
- Balança analítica digital;
- Dessecador;
- Estufa;
- Moldes cilíndricos;
- Mufla;
- pHmetro digital;
- Funil;
- Becker;
- Proveta;
- Pipeta;
- Erlenmeyers;
- Cápsulas de porcelana;
- Água destilada;
- Ácido acético glacial – CAS n° 64-19-7;
- Ácido sulfúrico PA – CAS n° 7664-93-9;
- Ácido clorídrico PA – CAS n° 7647-01-0

✓ Aglomerantes e Resíduos:

- O Cimento Portland usado do tipo: CP II-E 32. O Cimento Portland CP II-E 32 - Aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland

com gesso ao qual se adiciona, durante a operação adiciona proporções de escória de alto-forno

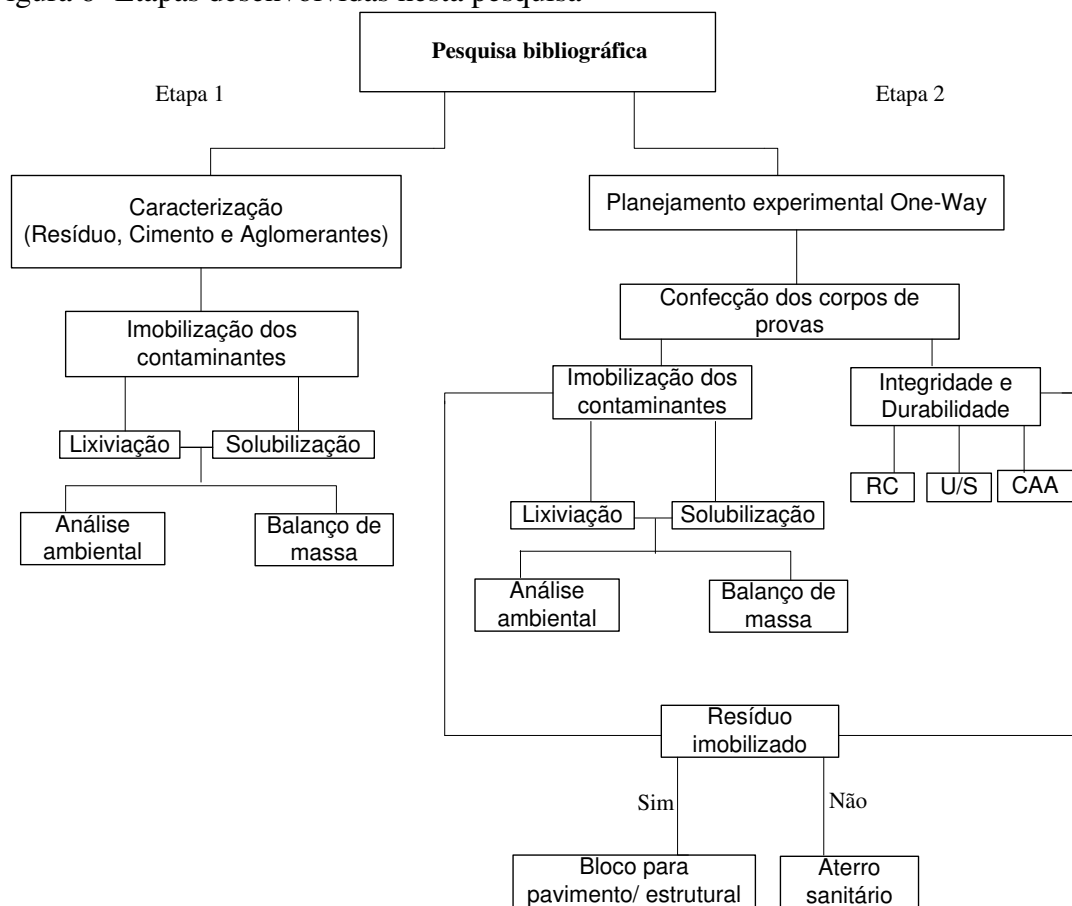
- A Brita usada classificada como número zero(0);
- Resíduo sólido passivo do Laboratório de Engenharia Química;
- Areia fina.

A pesquisa está dividida nas seguintes etapas:

- ✓ Classificação e caracterização do resíduo sólido passivo presente no laboratório de engenharia química, Cimento e Aglomerantes;
- ✓ Planejamento experimental;
- ✓ Confeção dos corpos de prova;
- ✓ Realização dos ensaios: Imobilização dos contaminantes, integridade e durabilidade, análise ambiental;
- ✓ Avaliação da retenção dos contaminantes;
- ✓ Análise estatística de dados;
- ✓ Balanço de massa;
- ✓ Avaliação das rotas para destinação final e utilização após a estabilização por solidificação.

A Figura 6 apresenta as etapas do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, Inicialmente realizou-se a caracterização do resíduo bruto, confecção de corpos de prova para análise de lixiviação e determinação da taxa de percentual a ser estudado.

Figura 6- Etapas desenvolvidas nesta pesquisa



LEGENDA - CAA: Capacidade de absorção de água; RC: Resistência à compressão; U/S: Umidificação e secagem.

FONTE: Elaborado pelo autor (2017)

De acordo com a Figura 6 observa-se que a primeira etapa, foi caracterização Resíduo sólido passivo, cimento e aglomerantes; a partir dos ensaios de Lixiviação os quais são base para a Análise ambiental e determina a quantidade de cromo presente no resíduo sólido passivo de laboratório. Foi realizado corpos de prova teste para realização do ensaio de lixiviação e determinação da quantidade de cromo lixiviado.

Posteriormente foi definido o planejamento do tipo one-way na análise de regressão. Definiu-se a porcentagem de resíduo de acordo com os resultados preliminares, realizou-se corpos de prova para análises de resistência a compressão, capacidade de absorção de água, umidificação/secagem, lixiviação e solubilização.



### 3.1. CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO RSL, CIMENTO E AGLOMERANTES

A caracterização do resíduo sólido de laboratório foi realizada mediante as análises físicas de: (i) Determinação dos Sólidos Totais (ST), ii) Sólidos Totais Voláteis (STV), iii) Sólidos Totais Fixos (STF), iv) Umidade (%H<sub>2</sub>O), as quais seguiram recomendações da APHA(2005).

Nesta pesquisa utilizou-se do Cimento Portland Comum (CPC), da marca Elizabeth, cuja especificação é CPII – Z32, o qual apresenta como resistência à compressão de 32 MPa garantidos após 28 dias de tempo de cura.

Para a confecção dos corpos de prova utilizou-se como agregados areia e brita, as quais foram obtidas no comércio da cidade de Campina Grande. A análise granulométrica realizada na areia foi por peneiramento, a qual foi realizada no laboratório da Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior (ATECEL) e que, de acordo com a ABNT NBR 7211/2009, classificou a areia como sendo agregado miúdo, tendo em vista que sua granulometria está numa faixa de 0,075 mm a 4,8 mm de diâmetro. Também foi feita análise granulométrica por peneiramento na brita, sendo classificada como agregado graúdo, pois sua granulometria está numa faixa de 4,8 a 9,5 mm de acordo com a ABNT NBR 7211/2009.

Para classificação do RSL, cimento e aglomerantes, foi realizado o teste de lixiviação, e posterior identificação dos metais pesados a partir da análise de absorção atômica realizada pela empresa Fuminneral, os resultados obtidos foram comparados com os estabelecidos pela ABNT NBR 10005 (2004) e ABNT NBR 10006 (2004).

### 3.2. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Nesta pesquisa foi adotado a análise de regressão no planejamento one-way. A regressão na análise de variância é uma técnica estatística para modelar e investigar a relação entre variáveis dependentes e preditoras. Um modelo de regressão que contenha um ou mais de um regressor é chamado de um modelo de regressão linear (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

Um modelo de regressão linear pode descrever a relação entre variáveis de entrada com a variável de saída, esse modelo é  $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon$ , em que Y representa a variável resposta medida,  $x_1$  representa um dos fatores influentes na variável resposta, e  $\varepsilon$  é um

termo de erro aleatório ou resíduo. Neste trabalho foi usado o fator percentual de resíduo sólido passivo de laboratório (RSL), fixando o tempo de cura em 28 dias. Inicialmente foram realizados testes para definir a melhor faixa do fator preditor, ou seja do percentual de resíduo, estabelecendo 3 níveis e 3 repetições para cada nível, totalizando 9 experimentos. Os percentuais finais estudados foram 0%, 5%, 20% e 35% de RSL.

Nesta pesquisas as variáveis respostas (Y) foram: Resistência a compressão, Capacidade de Absorção, Concentração de cromo total presente no extrato lixiviado e solubilizado.

### 3.3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS

Os corpos de provas foram preparados seguindo as etapas propostas pela ABNT NBR 7215/ 1996 e utilizando o Protocolo de avaliação de materiais E/S (BRITO, 2007). A preparação consistiu em:

- ✓ Inicialmente pesou os aglomerantes separadamente em uma balança analítica com precisão de 0,01 g.
- ✓ Em seguida, pesou o RSL em uma balança analítica com precisão de 0,01 g.
- ✓ Os aglomerantes e RSL foram colocados em uma bacia e misturados registrando a hora em que os aglomerantes entraram em contato com a água de forma a obter uma massa homogênea. Os interiores dos moldes foram lubrificados com óleo mineral, para facilitar o desmolde dos corpos de prova.
- ✓ Posteriormente foi colocada a pasta aos poucos no interior dos moldes cilíndricos, tendo o cuidado de comprimir bem com um bastão de vidro e batendo a base do molde sobre a bancada do laboratório, para evitar a formação de vazios no corpo de prova. Placas de vidro de 70 mm por 70 mm de aresta e de 5 mm de espessura, foram lubrificadas com óleo mineral, para serem colocadas na superfície dos moldes, evitando então a perda de água.
- ✓ O material ficou em repouso por um período de 24 horas para endurecimento da pasta. Após este período, o corpo de prova foi retirado do molde e deixado por um período de 28 dias de tempo de cura das amostras, para finalmente serem realizados os ensaios referentes aos critérios de integridade e durabilidade.

Foram realizados corpos de prova teste com porcentagem inicial de RSL de 5%, 15% e 30%, após a análise de lixiviação, foi definida a melhor faixa de percentual a ser

estudada para confecção dos corpos de provas finais. A Tabela 11 apresenta as massas do RSL, cimento e aglomerantes para preparação dos corpos de prova.

Tabela 11- Composição da Matriz Cimentícia dos Corpos de Prova

% RSL	AGLOMERANTES (g)					CORPOS DE PROVA (g)
	CPC	RSL	BRITA	AREIA	A/C	
5%	75	3,8	112,5	258,0	0,55	450
15%	75	11,3	112,5	251,3	0,55	450
30%	75	22,5	112,5	240,0	0,55	450

LEGENDA - CPC: Cimento Portland Comum; RSL: Resíduo Sólido de Laboratório.

FONTE: Elaborado pelo autor (2018).

A Tabela 11 apresenta as massas de RSL, cimento, brita e areia usadas para confecção dos corpos de prova com 450g, e traço de 1 de cimento para 5 de agregados de acordo com a porcentagem de resíduo, e a relação água cimento de 1:0,55. A seguir tem-se um exemplo de como as massas de cada componente foram encontradas:

Para 5% de RSL dias realizou-se os seguintes cálculos:

- Massa do cimento (CPC): Massa do Corpo de prova (CP)/6

Massa do CPC = 75g de cimento

- Massa do RSL (mL) = mCPC x porcentagem de RSL

Massa do RSL = 75 x 5%

Massa do RSL = 3,8 RSL

- Massa de brita (mL) = Magl. x 30%

Massa de brita = 375 x 30%

Massa de brita = 112,5

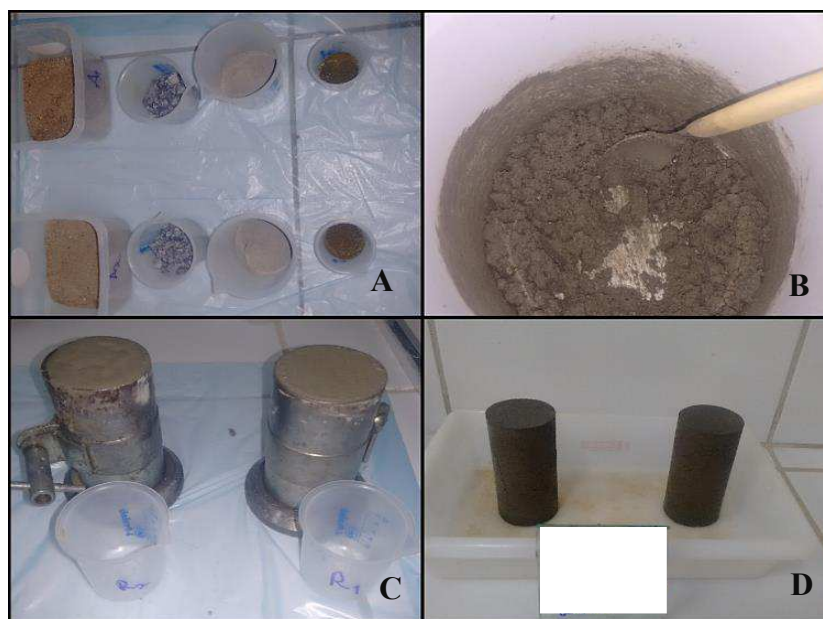
- Massa de areia (mA) = Magl. – Mrsl- Mb

Massa de areia = 375 – 3,8 - 112,5

Massa de areia = 258 g de areia.

É importante ressaltar que, a memória dos cálculos os quais possibilitou a obtenção da composição das matrizes cimentícias encontra-se descrita no Apêndice B. A Figura 7 apresenta as etapas de preparação dos corpos de prova.

Figura 7- Preparação dos corpos de prova.



FONTE: Autor(2018)

A Figura 7 (a) apresenta o aglomerante (cimento CII + Areia + Brita). A Figura 7(b) mostra a massa sendo formada a partir da mistura entre o aglomerante, o contaminante e a água destilada. A Figura 7(c) mostra a massa preparada já acondicionada nos moldes cilíndricos. A Figura 7(d) mostra os corpos de prova desmoldados, no decorrer do tempo de cura, para posterior realização dos ensaios.

### 3.4. AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE E DURABILIDADE

Para avaliação dos corpos de prova foi utilizado o Protocolo de Avaliação de Materiais E/S proposto por Brito (2007). Que se apresenta como uma ferramenta para avaliar integridade/durabilidade, além de mostrar as rotas de disposição dos resíduos tratados por E/S.

Nos corpos de prova finais foi realizado ensaio de resistência à compressão (ABNT NBR 7215, 1997), absorção de água (ABNT NBR 9.778) e Umidificação e secagem (WTC, 1991).

#### 3.4.1. Resistência a compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme ABNT (1996) - NBR 7215/1996 do setor cimento e concreto, específica para avaliar cimento Portland. A RC verifica a integridade do material E/S, analisando a capacidade em resistir a diferentes cargas de compressão mecânica. Em seguida, o cálculo da resistência a compressão, em

MegaPascal, é realizado dividindo a carga de ruptura pela área da seção do corpo-de-prova (ABNT NBR 7215, 1996).

$$RC = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Em que:

RC: Resistência a compressão em kPa;  
F: Força de ruptura dos corpos de prova em kg;  
Área: Área de seção dos corpos de provas em cm<sup>2</sup>.

A Figura 8 mostra o equipamento para realização do procedimento de resistência a compressão.

Figura 8- Equipamento de resistência a compressão



FONTE: Autor (2018)

Segundo Brito (2007), de acordo com resistência mecânica do material E/S, este pode ser usado para: execução de obras de alvenaria sem função estrutural, material de cobertura, pavimentação em obras de rodovias, uso em cerâmica vermelha (tijolos maciços, blocos cerâmicos e telhas) e fabricação de artefatos de concreto.

#### 3.4.2. Capacidade de Absorção de Água

O ensaio de capacidade e absorção de água foi realizado conforme ABNT (1987) - NBR 9778: “Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água,

índice de vazios e massa específica”, que avalia a porosidade do material endurecido ou E/S. A Figura 9 mostra a corpo de prova durante o teste de capacidade de absorção de água.

Figura 9- Ensaio de Capacidade de absorção de água



FONTE: Própria(2018)

A análise recomenda que se deva trabalhar com corpos de provas condicionados em estufa a 105°C e com uma relação líquido/sólido (L/S) 10:1. Após pesagem as amostras foram colocadas na estufa a 105°C por 24 horas. Posteriormente as amostras serão imersas em água a 23°C por ciclos de 24, 48 e 72 horas, as quais serão retiradas da água, enxugadas com papel absorvente, pesadas e imersas na água a cada ciclo. Cinco horas antes de se completar o período de 72 horas de saturação em água, as amostras foram progressivamente levadas à ebulição na placa aquecedora até 100°C. Em seguida, deixou esfriar, pela perda natural de calor até temperatura ambiente e foi feita a última pesagem.

O resultado foi expresso em % conhecendo-se a massa do corpo de prova após saturação em água e a massa do corpo de prova seco em estufa.

$$CAA(\%) = \frac{Msat - Ms}{Ms} \times 100 \quad (9)$$

Em que :

CAA: Capacidade de absorção de água

Msat: massa da corpo de prova após saturação em água e fervura;

Ms 105°C : massa do corpo de prova seco em estufa.

### 3.4.3. Umidificação e secagem

O ensaio de umidificação/secagem consiste em simular e avaliar o material resultante do procedimento de E/S, em relação à sua capacidade em resistir às variações de mudanças de estado, ou seja, umidificação do material com água a  $22 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  e secagem a  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , visando avaliar a durabilidade ao longo prazo e a perda de massa após sucessivos períodos de umidificação/secagem. Neste caso, a amostra é umidificada com água e posteriormente submetida à secagem.

$$PP (\%) = \frac{P_{nat} - P_{ciclo\ i}}{P_{nat}} \times 100 \quad (10)$$

Em que :

PP = Perda de Peso

$P_{nat}$  = Peso da amostra natural;

$P_{ciclo\ i}$  = Peso da amostra após ciclo de umidificação/secagem

Figura 10- Estufas para realização os experimentos de Umidificação/Secagem



FONTE: Autor (2018)

## 3.5. AVALIAÇÃO AMBIENTAL E IMOBILIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES

### 3.5.1. Lixiviação

ABNT NBR 10004 (2004) determina a análise de lixiviação como sendo o processo para a determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator.

O ensaio de lixiviação foi realizado nos aglomerantes, no RSL, no cimento e nas matrizes cimentícias, de acordo com o Anexo A.

Os dados serão comparados com os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, para então os resíduos serem classificados como classe I – perigosos e classe II – não perigosos.

Figura 11- Equipamento Rotativo de Frascos



FONTE: Autor (2018)

### 3.5.2. Solubilização

O teste de solubilização adotado foi o descrito pela norma ABNT NBR: 10.006/2004. De acordo com esse teste, a amostra será misturada com água destilada em um recipiente adequado, mantendo sempre a proporção de 1:4 em relação à amostra e a água destilada, e agitada em baixa velocidade por 5 minutos.

O recipiente foi coberto com filme de PVC, permanecendo em repouso por sete dias na temperatura de 25°C. Após esse período, a solução será filtrada utilizando uma membrana filtrante com porosidade de 0,45  $\mu\text{m}$ , para obter o extrato solubilizado, no qual onde será possível determinar concentração de Cromo Total. No Anexo 1, encontra-se o procedimento do ensaio.

Para os ensaios de metais pesados os mesmos foram encaminhados, também, para Funmineral e submetidos a análise em um espectrofotômetro de absorção atômica da marca Shimadzu Modelo AA – 6800.

## 3.6. EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DOS CONTAMINANTES

A retenção dos contaminantes foi calculada em função das massas e concentrações dos resíduos e aglomerantes conforme a Equação 11. O objetivo é avaliar e comparar se as massas dos agentes influenciarão na eficiência de retenção dos contaminantes (Brito, 2007):



$$[X]_{\text{Eficiência Retenção(\%)}} = \left[ 1 - \left( 1 + \frac{RS}{Agglom} \right) \cdot \frac{[y]_{\text{Tratado}}}{[z]_{\text{Bruto}}} \right] \times 100 \quad (11)$$

Em que:

X : Eficiência de retenção (%)

RS: Massa do RSL (kg)

Agglom. : Massa do aglomerante (kg)

[y]Tratado: Concentração do extrato lixiviado do material tratado (mg.kg<sup>-1</sup>)

[z]Bruto : Concentração do extrato lixiviado do resíduo bruto (mg.kg<sup>-1</sup>)

Observação:

A concentração do extrato lixiviado em mg.kg<sup>-1</sup> foi obtida após a determinação do contaminante em mg.L<sup>-1</sup> e a sua relação com a massa da amostra e o volume da solução lixiviante. A massa da amostra será aquela do ensaio de lixiviação de acordo com a relação 12.

$$[\text{mg.Kg}^{-1}] = (\text{mg /L}) \cdot (\text{L/ Kg}) \quad (12)$$

### 3.7. DETERMINAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA DOS CONTAMINANTES

O balanço de massa será realizado para determinar a redução em cada tratamento após a E/S em termos da massa aplicada, lixiviação e acumulação do Resíduo Sólido de Laboratório (LEITE; 1997; BRITO, 1999).O balanço de massa será calculado pela Equação 13.

$$\text{Massa}_{\text{(Contam. Retida)}} = \text{Massa}_{\text{Contam (RSL bruto)}} - \text{Massa}_{\text{Contam (Tratado)}} \quad (13)$$

Em qual:

Massa<sub>(Contam. Retida)</sub> = Massa do contaminante retida na matriz de cimento;

Massa<sub>Contam (RSL bruto)</sub> = Massa do contaminante presente na RSL antes do tratamento em g,;

Massa<sub>Contam (Tratado)</sub> = Massa do contaminante presente no Material E/S após o tratamento em g.

As massas do contaminante bruto(i) e tratado(i) são encontradas pela equação 14

$$\text{Massa}_{(i)} = Z \times Y\% \quad (14)$$

sendo Z a massa seca dada pela equação 15:

$$\text{Massa}_{(i)}(Z) = \% \text{de ST} \times \text{Massa}_{(i)}(\text{kg}) \quad (15)$$

e y% encontrado pela equação 16 que determina a porcentagem de contaminante:

$$y = (\text{concentração de contaminante}_i \times 100) / 1000 \quad (16)$$

### 3.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS

Para verificar se existem efeitos significativos entre as respostas médias dos tratamentos, foi realizada a Análise de Variância (Analysis of Variance - ANOVA). O procedimento utilizado para inferir se tais efeitos realmente existem, a determinado nível de confiança (MONTGOMERY e RUNGER, 2003; MONTGOMERY, 2003).

A verificação do modelo proposto da regressão linear simples foi realizado segundo recomendação de Montgomery e Runger (2003), por meio do teste estatístico de hipóteses em relação aos parâmetros do modelo. Duas hipóteses foram testadas:

- 1ª Hipótese: Hipótese da Nulidade ( $H_0$ ):  $\beta_1 = 0$ ;
- 2ª Hipótese: Hipótese Alternativa ( $H_a$ ):  $\beta_1 \neq 0$

A hipótese de nulidade ( $H_0: \beta_1 = 0$ ) é equivalente a concluir que não ocorre relação linear entre  $x$  (*percentual de resíduo de laboratório*) e  $Y$  (*resposta*).

A hipótese alternativa ( $H_1: \beta_1 \neq 0$ ) equivale a afirmar que ocorre relação linear entre  $x$  (*percentual de resíduo de laboratório*) e  $Y$  (*resposta*), ou seja, o valor esperado de  $Y$  é afetado pelos valores de  $x$ .

Deste modo, a relação linear entre a variável aleatória ( $y$ . *variável dependente*) e a variável não aleatória ( $x$ . *variável independente*) é descrita pela equação 17

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \varepsilon \quad (17)$$

Em que:

- $\beta_0$  e  $\beta_1$  são os parâmetros do modelo
- ( $\varepsilon$ ) é o erro aleatório associado à determinação de  $y$
- $Y$  representa a resposta
- $x$  é o *percentual de resíduo sólido de laboratório*.

A Tabela 12 mostra a saída computacional do *Minitab 17.0*, para o planejamento one way na análise de regressão.

Tabela 12- Análise de variância (ANOVA)

Fonte	G.L	Soma do Quadrado (SQ)	Quadrado Médio (QM)	Valor F	Valor p <sup>1</sup> e <sup>2</sup>
<b>Regressão</b>	1	SQR	QMR	QMR/QME	-
<b>Resíduo</b>	n - 2	SQE	QME	-	-
<b>Total</b>	n - 1	SQT	-	-	-

LEGENDA: Valor p<sup>1</sup>: Significativamente diferente ( $p \leq 0,05$ ); <sup>2</sup>Não significativo ( $p > 0,05$ ); n: Número

de observação.

FONTE: Minitab 17.0(2014).

O coeficiente de determinação  $R^2$  é uma medida da quantidade de redução na variabilidade de  $y$ , obtida pelo uso das regressões  $x_1$  e  $x_2, \dots, x_k$  (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

A utilização do coeficiente de determinação ajustado faz-se interessante quando há conjuntos regressores com variáveis diferentes, porém com o mesmo número de variáveis regressoras. O coeficiente de determinação é calculado usando-se a Equação 18

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad (18)$$

Em que:

$R^2$ : Coeficiente de determinação;

SQR: Soma de quadrados da regressão;

SQT: Soma de quadrados totais.

O coeficiente de correlação ( $R$ ) será calculado usando a equação 19 que representa a correlação entre as variáveis.

$$R = \sqrt{R^2} \quad (19)$$

O valor de  $R$  varia entre -1 e 1 e quanto mais próximo de 1 significa melhor resultado. O valor -1 indica uma correlação linear negativa e o valor 1 indica uma correlação linear positiva. É um número usado para classificar a correlação da seguinte forma:

- $R = 1$  à Perfeita
- $R$  entre 0,75 e 1: Forte
- $R = 0,5$  e  $< 0,75$  à Média
- $R < 0,5$  à Fraca
- $R = 0$  à Inexistente

A porcentagem máxima de variação explicável é calculada usando a equação 20 que representa o máximo de variação que o modelo explica. Este valor deve ser comparado com o valor explicado pelo modelo ( $R^2$ ).

$$R^2 \text{ max} = \frac{SQ_{Total} - SQ_{Puro\_erro}}{SQ_{Total}} \quad (20)$$

Será utilizado o *Software Minitab 17.0*. Este está sendo cada vez mais utilizado pois, apresenta fácil manuseio além de incorporar uma série de recursos de manipulação de dados, de controle de qualidade, projeto de experimentos (DOE), análise de

confiabilidade, de confecção de gráficos e de rotinas de análise estatística que irão satisfazer às necessidades desse trabalho (MINITAB 17.0, 2014).

### 3.9. AVALIAÇÃO DE ROTAS PARA DESTINAÇÃO FINAL E UTILIZAÇÃO APÓS A ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO

Na Tabela 13 encontram-se os limites determinados para os parâmetros resistência a compressão, Capacidade de Absorção de água e umidificação e secagem proposto pelo protocolo de valiação de materiais E/S( BRITO,2007).

Tabela 13 - Critérios de integridade/Durabilidade e limite máximos permitidos

Critério de Avaliação (Limitante)	Material E/S	Material E/S com Restrição	Material Solidificado	Material Estabilizado	Estabilizado com Restrição
	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)
Resistência à compressão:	$\geq 1$ Mpa	$\geq 1$ Mpa	$\geq 0,8$ MPa	$< 1$ Mpa	$< 1$ Mpa
Capacidade de Absorção de água	$\leq 40$ %	$\leq 40$ %	$> 40$ %	$> 40$ %	$> 40$ %
Umidificação/secagem (06 ciclos)	$\leq 15\%$	$\leq 15\%$	$\leq 15\%$	$\leq 15\%$	$\leq 15\%$

FONTE: Brito (2007)

De acordo com as análises de Resistência a compressão(RC), Capacidade de Absorção de Água (CAA), Umidificação/Secagem (U/S), Lixiviação e Solubilização. Brito (2007) determinou onde os ensaios realizados a partir da E/S podem ser empregados , mantido ou disposto: Utilização sem restrição, utilização com restrição, disposição em aterro de resíduo perigosos, utilização controlada, e disposição em aterro de resíduo não perigoso.

✓ Utilização sem restrição: O material foi satisfatório em todos os ensaios, podendo então ser usado em materiais de construção (tijolos maciços, blocos vazados e peças de concreto) ou como material de base e cobertura em obras de pavimentação.

✓ Utilização com restrição: Esse material foi aprovado em todos os testes, exceto o de solubilização, podendo ser utilizado com restrição referente a faixas de resistência a compressão, como mostra Tabela 14.

Tabela 14- Utilização do material E/S

Utilização	Parâmetros de Aceitação (Resistência à Compressão)
Uso como material termoplástico (betume) <sup>1</sup>	≥ 0,9 MPa
Uso como material termoplástico (polietileno) <sup>1</sup>	≥ 14 MPa
Uso como material termofixo <sup>1</sup>	≥ 20 MPa
Uso como bloco vazado em concreto comum <sup>2</sup>	4,5 a 16 MPa
Uso como material de base em pavimentação <sup>3</sup>	3 a 5 MPa
Uso como material de cobertura em pavimentação <sup>3</sup>	10 a 15 MPa
Uso como tijolos maciços <sup>4</sup>	1,5 a 4 MPa
Uso como peça de concreto <sup>5</sup>	35 MPa

Nota:

<sup>1</sup> Valor recomendado por SPENCE e SHI (2005)

<sup>2</sup> Valor indicado para bloco vazado de concreto segundo ABNT NBR 7215 (1996)

<sup>3</sup> Valor para material em obras de pavimentação segundo MULDER (2002)

<sup>4</sup> Valor para fabricação de tijolos maciços conforme ABNT NBR 7170 (1983 d)

<sup>5</sup> Valor para confecção de peças de concreto conforme ABNT 6136 (1994)

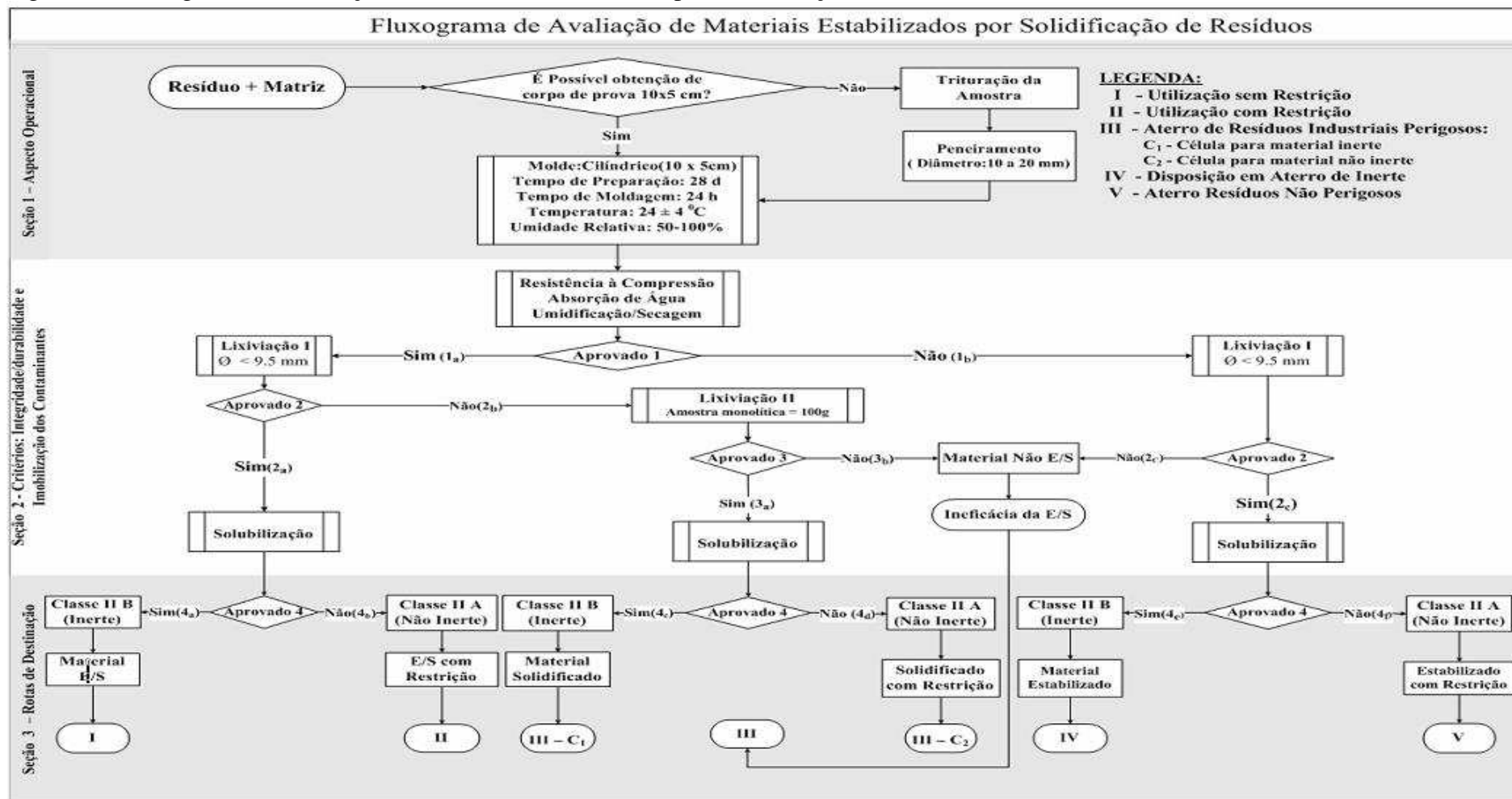
FONTE: Brito (2007)

✓ Disposição em locais de resíduos perigosos: O material é aprovado nos testes de resistência a compressão, absorção de água e umidificação/secagem, porém reprovado no teste de lixiviação e submetido a um segundo teste de lixiviação, se for aprovado nesse segundo é então realizado o ensaio de solubilização que pode ser definido como solidificado ou solidificado com restrição. Que é disposto em aterro de resíduos industriais perigosos Classe II A ou Classe II B, ou ainda, para local de resíduos perigosos.

✓ Disposição em Aterro de Materiais Inertes, os materiais que são dispostos em aterro de materiais inertes com base na resolução 15.113 da ABNT, são os que foram reprovados nos ensaios de resistência a compressão, capacidade de absorção de água, Umidificação/Secagem, porém aprovados nos testes de lixiviação e solubilização.

✓ Disposição em aterro de resíduos não-perigosos, quando o material é reprovado em todos os testes, são destinados para aterro de resíduos não perigosos, que é um local que garante a proteção adequada ao meio superficial e subterrâneo conforme o Projeto de Aterros Sanitários (ABNT NBR 8.419) e Aterro de Resíduos não perigosos (ABNT NBR 13.896).

Figura 12- Fluxograma de Avaliação de Materiais Estabilizados por Solidificação de Resíduos



Fonte: Brito, 2007.

No Brasil a ABNT NBR 9781(2013), estabelece as especificações para o uso das peças de concreto para pavimentação, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15- Especificações da norma brasileira para peças de concreto

Requisito	Limites aceitáveis		
Absorção	Valor médio $\leq 6,0\%$		
	Valor individual $\leq 7,0\%$		
Resistência característica à compressão aos 28 dias	$\geq 35\text{MPa}$ para tráfego leve e de pedestres		
	$\geq 50\text{ MPa}$ para tráfego pesado		
Resistência à abrasão*	Cavidade máxima $\leq 23\text{mm}$ para tráfego leve e pedestres		
	Cavidade máxima $\leq 20$ para tráfego pesado		
Tolerância Dimensional (mm)	Comprimento	Largura	Altura
	$\pm 3$	$\pm 2$	$\pm 3$

LEGENDA: \*Segundo a ABNT NBR 9781:2013, o ensaio de resistência à abrasão é facultativo.

De acordo com a Tabela 15 é possível determinar a utilidade dos corpos intertravados. Os fatores que vão determinar a resistência a compressão são as propriedades e proporções dos materiais que compõem a dosagem do concreto, grau de adensamento e condições de cura. Estando diretamente relacionados ao tipo de cimento utilizado e do fator água/cimento durante o processo de dosagem (MEHTA, 1994).

## CAPÍTULO 04

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DO RSL, CIMENTO E AGLOMERANTES

O Resíduo Sólido de Laboratório, cimento e aglomerantes foram caracterizados quanto ao teor de sólidos totais, sólidos voláteis, sólidos totais fixos e Umidade conforme consta na Tabela 16.

Tabela 16- Caracterização dos sólidos totais e suas frações

Materiais	Parâmetros			
	% ST	% STV*	% STF*	% U
<b>RSL</b>	87,57	20,26	79,74	12,43
<b>Cimento</b>	99,25	1,03	98,97	0,75
<b>Brita</b>	99,98	0,10	99,90	0,02
<b>Áreia</b>	99,81	1,06	98,94	0,19

LEGENDA: \*Valor em função do teor de ST. ST: Sólidos totais; SF: Sólidos fixos; SV: Sólidos voláteis; U: Umidade. FONTE: Dados da pesquisa (2018)

De acordo com a Tabela 16 o RSL apresentou 87,57% de sólidos totais, ou seja, total da massa seca, deste total 79,74% são sólidos totais fixos, ou seja, o material inorgânico, e 20,26% representa a fração de sólidos totais voláteis, ou seja, a matéria orgânica presente no RSL. Já com relação à umidade, teve um valor de 12,43%.

Em relação ao teor de umidade não é viável para o processo de estabilização por solidificação que o resíduo apresente uma quantidade elevada de água, pois o excesso de água dificulta as reações entre os agentes solidificantes e o resíduo sólido de laboratório.

O cimento CII-Z32 possuiu 99,25% de sólidos totais, deste total 98,97% se refere aos sólidos totais fixos, e 1,03% equivale a fração de sólidos totais voláteis. Com relação a umidade, o cimento apresentou um valor de 0,75%. Na Tabela 17 tem-se a caracterização de vários cimentos estudado por outros autores.

Tabela 17-caracterização físico-química

Compostos	Parâmetros			
	% ST	% STV*	% STF*	% U
<sup>1</sup> CP-II-F-32	99,62	1,04	98,96	0,36
<sup>2</sup> CP-II-E	98,56	1,82	98,18	1,44
<sup>2</sup> CP-II-Z	99,30	1,01	98,99	0,70
<sup>2</sup> CP- IV	98,88	1,12	98,88	1,12
CP <sup>3</sup> – CIMPOR	98,20	1,10	98,9	1,81
<sup>2</sup> Areia	99,24	0,07	99,93	0,76
<sup>3</sup> Areia	99,80	0,60	99,4	0,23

FONTE: Dias,2015(1); Sousa,2017(2); Guimarães,2017(3)



A Tabela 17 apresenta a caracterização de diversos cimentos, entre eles o cimento CPII-Z usado nessa pesquisa, os teores deste variaram em aproximadamente  $\pm 0,05$  comparado aos valores apresentados na Tabela 16 para o mesmo cimento. O cimento CP-II-E de todos apresentados é o que mais se difere em relação aos teores com 98,56% de ST, comparado a 99,25% referente ao cimento usado nesse trabalho. O CP-II-f-32 se destaca por apresentar o menor teor de umidade, com apenas de 0,36% comparado aos demais.

Como esperado a brita é formada em sua maioria por sólido totais, representando 99,98% de sua massa seca, os sólidos fixos constituem 99,90% e os sólidos voláteis 0,10%, a umidade representa apenas 0,02%. Comparado os resultados com os encontrados por Sousa (2017), a fração de sólidos totais foi igual ao encontrado nessa pesquisa, diferindo-se apenas para os sólidos fixos e voláteis com 99,98% e 0,02% respectivamente.

A areia apresentou teor de sólidos totais igual a 99,81%, enquanto que a umidade apresentou 0,19%. O valor de sólidos voláteis foi igual a 1,06%, os sólidos totais fixos em torno de 98,94% e sólidos totais 99,81%. Os valores encontrados estão próximos aos encontrados por outros autores como Guimarães (2017) que também encontrou o mesmo teor de sólidos totais e conseqüentemente umidade de 0,2%, já Sousa (2017) em seu estudo encontrou uma umidade para areia de 0,76%.

A Tabela 18 a seguir apresenta a caracterização do resíduo sólido sintético(RSS) formado por compostos inorgânicos como areia e sais de nitrato contendo espécies metálicas estudado (OLIVEIRA,2012).

Tabela 18 – Resultados ST, STF, STV, umidade

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Sólidos Totais	97,82%
Sólidos Totais Fixos *	96,19%
Sólidos Totais Voláteis*	3,81%
Umidade	2,18%

FONTE: Oliveira (2012) \*Em relação ao teor de sólidos totais

Apesar de ser um resíduo sólido sintético, formado por compostos químicos padrão analítico (PA) assim como o RSL, a caracterização destes diferem, principalmente em termos de sólidos totais e umidade, com 97,82% de massa seca no RSS e 87,57% no RSL. Quando comprado a umidade, o teor de umidade do RSL é menor, é provável que a resistência usando RSS seja maior, pois água em excesso pode separar agentes aglomerantes, dificultando assim,

as reações entre os agentes solidificantes e contaminantes, já que no contato entre água, cimento e resíduo, ocorre a reação de hidratação do cimento, havendo liberação de água.

A partir dos teores encontrados para o cimento e aglomerantes e RSL, temos que esse são de alta eficácia para o processo, pois contém baixo teor de matéria orgânica e baixa umidade, dessa forma têm tendência a gerar materiais com alta resistência e integridade.

A classificação do resíduo sólido de laboratório, cimento e aglomerantes se deram a partir do teste de lixiviação, para determinar a toxicidade dos metais.

#### 4.2. CLASSIFICAÇÃO DO RSL, CIMENTO E AGLOMERANTES

Na Tabela 19 encontram-se informações quantitativas dos metais presente no Cimento, areia e brita. A comparação com os limites máximos no extrato lixiviado segundo ABNT NBR 10005/2004 e ABNT NBR 10006/2004, Ministério da Saúde (MS) Portaria N. 518 de 2004, pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) - Portaria N0 195 de 2005, Norma Técnica FEEMA: Padrões de lançamento de efluentes líquidos.

Tabela 19- Teor de metais presentes no extrato lixiviado do cimento, areia e brita.

Contaminante	Concentração (mg.L <sup>-1</sup> )			Limite Máximo Permitido ( mg.L <sup>-1</sup> )
	Cimento	Areia	Brita	
Alumínio <sup>(2)</sup>	35,1	-	-	0,2
Cobalto <sup>(4)</sup>	0,15	-	-	1
Zinco <sup>(3)</sup>	< 0,10	0,15	0,13	5
Cobre <sup>(3)</sup>	< 0,10	< 0,10	0,14	2
Níquel <sup>(3)</sup>	0,23	< 0,10	-	0,02
Cromo <sup>(1)</sup>	0,54	-	-	5
Cádmio <sup>(1)</sup>	< 0,10	< 0,10	< 0,10	0,5

LEGENDA: <sup>1</sup> Parâmetros e limites máximos no extrato lixiviado e solubilizado conforme recomendação da ABNT NBR 10004 (2004).

<sup>2</sup> Valores baseados no Ministério da Saúde (MS) - Portaria N. 518 de 2004 (MS, 2004)

<sup>3</sup> Valores sugeridos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) - Portaria N0 195 de 2005 (CETESB, 2005)

<sup>4</sup> Valores sugeridos pela NT – 202 R.10 – Norma técnica FEEMA: Padrões de lançamento de efluentes líquidos.

Os dados da Tabela 19, mostram que o cimento apresentou quantidade de metal alumínio acima do limite máximo permissível recomendado pelas normas reguladoras. Neste contexto, o cimento é classificados como material contaminados.

De acordo com as reações do cimento, quando o cimento encontra-se no estado sólido, os elementos estão disponíveis e de fácil lixiviação. Porém, ao entrarem em contato com água as principais fases de hidratação (alita e belite) são responsáveis pela fixação dos metais na molécula do cimento.

Na Tabela 20, encontram-se o resultado da concentração de cromo total no extrato lixiviado o resíduo sólido de laboratório *in natura*.

Tabela 20- Teor de cromo presente no extrato lixiviado do Resíduo sólido de laboratório.

Contaminante	Concentração		Limite Máximo Permitido	
	(mg.L <sup>-1</sup> )	(mg.kg <sup>-1</sup> )	(mg.L <sup>-1</sup> )	(mg.kg <sup>-1</sup> )
Cromo total <sup>(1)</sup>	114	2279,54	5	100

LEGENDA: <sup>1</sup> Parâmetros e limites máximos no extrato lixiviado e solubilizado conforme recomendação da ABNT NBR 10004 (2004b).

Na Tabela 20 estão apresentados os valores do contaminante cromo no RSL. A concentração do cromo total presente no extrato lixiviado foi igual a 114mg.L<sup>-1</sup>, enquanto que o limite máximo é de 5mg.L<sup>-1</sup>. Pode-se concluir que o RSL é classificado como sendo perigoso Classe I, devido a sua toxicidade.

Os resíduos perigosos, Classe I, são classificados por apresentarem, riscos à saúde e/ou meio ambiente. De modo geral são os que têm intrínsecas propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (LIMA, 2011). No caso, desta pesquisa os mesmos são perigosos devido à toxicidade, já que o ensaio de lixiviação e o ensaio de detecção dos contaminantes foram realizados para a toxicidade como preconiza a Norma 10.0005 da ABNT de 2004.

Diante disso, constata-se que esse resíduo não deve ser descartado no meio ambiente, sem tratamento prévio. Uma forma de tratá-lo para uma disposição final, é o uso da técnica de Estabilização por Solidificação.

Nesta pesquisa foram realizados ensaios preliminares com 5%, 15% e 30% de incorporação de RSL. Na Tabela 21 estão os resultados das concentrações de alguns metais presente no extrato lixiviado dos corpos de prova com 5%, 15% e 30% de RSL.

Tabela 21- Teor de metais presentes nos corpos de prova

Contaminante	Concentração (mg.L <sup>-1</sup> )			Limite Máximo Permitido	Limite Máximo Permitido
	5%	15%	30%	( mg.L <sup>-1</sup> )	( mg.kg <sup>-1</sup> )
Alumínio <sup>(2)</sup>	< 0,10	< 0,10	< 0,10	0,2	4
Cobalto <sup>(4)</sup>	0,12	0,073	0,017	1	20
Zinco <sup>(3)</sup>	0,014	0,030	0,030	5	100
Cobre <sup>(3)</sup>	0,046	0,056	0,044	2	40
Níquel <sup>(3)</sup>	0,22	0,13	0,22	0,02	0,4
Cromo <sup>(1)</sup>	0,91	3,01	4,19	5	100
Cádmio <sup>(1)</sup>	0,044	0,041	0,069	0,5	50

LEGENDA: <sup>1</sup> Parâmetros e limites máximos no extrato lixiviado e solubilizado conforme recomendação da ABNT NBR 10004 (2004b).

<sup>2</sup> Valores baseados no Ministério da Saúde (MS) - Portaria N. 518 de 2004 (MS, 2004)

<sup>3</sup> Valores sugeridos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) - Portaria N0 195 de 2005 (CETESB, 2005)

<sup>4</sup> Valores sugeridos pela NT – 202 R.10 – Norma técnica FEEMA: Padrões de lançamento de efluentes líquidos.

Pode-se constatar na Tabela 21 que todos os valores de contaminantes foram reduzidos para valores abaixo do LMP, com exceção do níquel. Com relação ao foco da pesquisa, cromo total apresentou redução significativa.

Nesse estudo o RSL em relação ao metal cromo passou de classe I para classe II, em todos os testes. Quando incorporado 30% de RSL lixiviou apenas 4,19mg/l resultado satisfatório, pois está dentro do limite máximo permissível.

Todas as incorporações comprovam que a estabilização por solidificação é satisfatória, pois o cromo total que antes do tratamento lixiviou em média 114mg/L, e após a E/S obteve uma redução de lixiviação em média de 97,63%.

Ferreira (2013) também obteve resultados satisfatórios, os resíduos estudados foram Pedra Sabão (PS) e Escória de ferro-ligas de Manganês(ESC), em todos os testes o metal cromo esteve dentro do limite permissível variando de 0,047 a 0,061 mg/L, como mostra a Tabela 3.

Na pesquisa realizada por Ueda (2017) a qual incorporou lodo de curtume variando a 0,5% a 2,0%, vide Tabela 7, de resíduo o cromo teve concentração variando de 0,23 a 0,64 mg/L de cromo, comprovando que quanto mais adiciona resíduo a matriz maior, será a lixiviação.

A Tabela 22 apresenta concentrações do metal Cromo, estudada por outros autores para resíduos industriais e sintéticos.

Tabela 22- Teor de Cromo

<b>Metal</b>	<b>Conc. do lixiviado bruto mg.L<sup>-1</sup></b>	<b>Conc. do lixiviado E/S mg.L<sup>-1</sup></b>	<b>LMP mg.L<sup>-1</sup></b>
Cromo <sup>1</sup>	73,1	0,12	5,0
Cromo <sup>2</sup>	8,270	0,50	5,0

FONTE: <sup>1</sup>Sousa (2010); <sup>2</sup>Dias (2015).

Como podemos observar na tabela 24 alguns autores analisaram a imobilização do metal cromo presente em resíduo sólido industriais e sintéticos, obtendo sucesso em seus tratamentos, reduzindo em mais de 90% concentração do metal pesado.

Sousa (2010) obteve uma imobilização bastante eficiente reduzindo o metal cromo, de 73,1 mg.L<sup>-1</sup> para 0,12 mg.L<sup>-1</sup>, representando um aprisionamento 99,83% do metal cromo. Já Dias (2015) em seu resíduo bruto apresentou uma menor quantidade de cromo e reduziu a liberação de cromo em 93%, sendo assim é necessário que se tenha um estudo prévio para determinar quanto de resíduo a matriz é capaz de incorporar.

A avaliação do material E/S se dará de acordo com os resultados dos ensaios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes. Para ser considerado aprovado nestes critérios, o material deverá ser aprovado nos seguintes ensaios: resistência à compressão; umidificação, capacidade de absorção de água além e ser aprovado nos parâmetros associados à imobilização dos contaminantes os quais encontram-se relacionados aos extratos de lixiviação e solubilização (BRITO, 2007).

#### *4.2.1. Avaliação da integridade e durabilidade*

O ensaio de resistência à compressão foi utilizado para verificar a capacidade do material E/S em resistir a diferentes cargas de resistência à compressão mecânica, ou seja, sua integridade física.

A Tabela 23 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão relativa aos tratamentos do planejamento fatorial one-way e ao teste em branco com 0% de resíduo conforme a ABNT NBR 7215 (1996).

Tabela 23. Respostas do ensaio de Resistência à Compressão (RC).

<b>Experimento</b>	<b>Nível do Fator (% RSL)</b>	<b>RC (MPa)</b>
<b>Exp.0</b>	0	7,66
<b>Exp.0</b>	0	7,35
<b>Exp.0</b>	0	7,97
<b>Exp. 1</b>	5	7,62
<b>Exp.1</b>	5	7,21
<b>Exp. 1</b>	5	7,25
<b>Exp. 2</b>	20	4,27
<b>Exp.2</b>	20	3,84
<b>Exp.2</b>	20	4,17
<b>Exp.3</b>	35	2,07
<b>Exp.3</b>	35	2,39
<b>Exp.3</b>	35	2,91

LEGENDA: Exp- Experimento;RSL- Resíduo Sólido de Laboratório; RC- Resistência a Compressão; Mpa – Mega pascal

FONTE: Dados da pesquisa, 2018.

No planejamento experimental fatorial one-way, tem-se a partir dos resultados apresentados na Tabela 23 que todos os tratamentos do planejamento, apresentaram resistência à compressão superior a 1 MPa, dessa forma, estes materiais poderão ser utilizados, como materiais de base de cobertura em obras de pavimentação e artefatos da construção civil. Os melhores valores de RC foram obtidos pelos tratamentos Exp 1, todos com tempo de cura de 28 dias e uma porcentagem de RSL igual a 5%, atingindo uma resistência média de 7,36 MPa.

Comparando os resultados da Tabela 23 com os limites apresentados na Tabela 14 que determina a aplicação de cada material de acordo com a resistência a compressão, temos que todos os tratamentos poderão ser usados como material termoplástico (betume), pois apresentaram resistência  $\geq 0,9$  MPa, porém nenhum dos tratamentos apresentaram resistência maior que 35MPa dessa forma de acordo com a ABNT 6136/1994 os materiais não terão aplicação como peça de concreto.

O tratamento com a menor porcentagem (5%) obteve a maior resistência estando dentro do limite de 4,5 MPa a 16 MPa, podendo então ser utilizado para confecção de blocos vazado de concreto comum. Os tratamentos com 20% e 35% de incorporação de resíduo poderão também serem usados respectivamente como material de base em pavimentação e como tijolos maciços.

É conveniente ressaltar que, o material só será estabilizado por solidificação caso seja aprovado também nos ensaios de capacidade de absorção de água, umidificação e secagem, lixiviação e solubilização (BRITO,2007).

Observa-se que a medida que a porcentagem de RSL foi aumentando a resistência foi diminuindo, a resistência com apenas 5% de resíduo não sofreu alteração. Porém a incorporação de 35% RSL promoveu uma redução de 66,55% na resistência a compressão quando comparado com o tratamento de 0%. Resultado semelhante foi encontrado por Ivanov (2014) quando incorporou 25% de dicromato de potássio a matriz com 28 de cura, havendo uma redução de 56,66% da resistência a compressão.

Outros autores como Sales e Filho (2014), Ivanov (2014) e Almeida (2017) também encontraram resultados de diminuição da resistência a compressão a medida que a quantidade de resíduo aumentou, mas autores a exemplo de Campos (2011), Silva (2017) e Araújo (2017) obtiveram aumento na RC fato justificado pela atividade pozolânica presente no resíduo.

De acordo com o limite estabelecido pela Agência de Normalização da França (AFNOR, 1994), para o ensaio de umidificação e secagem, tem-se que a perda de massa após os 6 ciclo não deve ser superior a 15% de sua massa inicial. A Tabela 24 apresenta os resultados do ensaio de umidificação e secagem relativa aos 3 tratamentos do planejamento fatorial one-way em triplicata.

Tabela 24. Respostas do ensaio de Umidificação e Secagem (U/S).

<b>Experimento</b>	<b>Nível do Fator (% RSL)</b>	<b>(U/S)</b>
		<b>(%)</b>
<b>Exp.0</b>	0	1,68
<b>Exp.0</b>	0	1,38
<b>Exp.0</b>	0	1,12
<b>Exp.1</b>	5	0,39
<b>Exp.1</b>	5	1,06
<b>Exp.1</b>	5	0,80
<b>Exp.2</b>	20	1,14
<b>Exp.2</b>	20	0,88
<b>Exp.2</b>	20	1,16
<b>Exp.3</b>	35	1,76
<b>Exp.3</b>	35	1,47
<b>Exp.3</b>	35	1,59

LEGENDA: U/S: umidificação e secagem; Exp- Experimento; RSL- Resíduo Sólido de Laboratório.  
FONTE: Dados da pesquisa, 2018.

Todos os tratamentos foram aprovados no ensaio de U/S por estarem dentro do limite máximo permissível, ou seja, uma perda de massa inferior a 15%. A melhor média de resultado encontrada refere-se ao tratamento com porcentagem de 5% de resíduo em sua composição, o

qual apresentou uma perda de massa de apenas de 0,75%, resultado bastante satisfatório, pois quanto menor for a perda de massa das matrizes cimentíceas mais eficiente será o material estabilizado (Brito, 2007).

Comparando os resultados de U/S encontrados para a matriz com e sem resíduo, temos que a adição de resíduo ocasiona uma diminuição na perda de massa, pois a matriz com 5% de resíduo teve um desempenho 0,96% melhor quando comparado a matriz que não contém resíduo.

Temos ainda que o maior percentual de umidificação e secagem se deu para a matriz com incorporação de 35% de RSL, obtendo uma perda de massa média de 1,61%, resultado ainda satisfatório por se encontrar dentro da faixa desejada de 15% de perda de massa.

Em uma análise geral tem-se que percentual de U/S variou em média de 0,75% a 1,61% entre os tratamentos estudados. Temos um processo diretamente proporcional, ou seja, à medida que aumenta a porcentagem de RSL nos tratamentos aumentam também a porcentagem de umidificação e secagem.

Alguns autores como Guimarães (2017), Sousa (2017) e Dias (2015) também estudaram a perda de massa em matrizes. A Tabela 25 apresenta os resultados encontrados pelos autores.

Tabela 25- Resultados de U/S encontrados por diversos autores

<b>Autor</b>	<b>Nível do Fator (% resíduo)</b>	<b>(U/S) (%)</b>
<b>Guimarães(2017)</b>	5	3,18
<b>Guimarães(2017)</b>	25	6,00
<b>Sousa (2017)</b>	10	1,06
<b>Sousa (2017)</b>	30	1,33
<b>Dias(2015)</b>	5	1,79
<b>Dias(2015)</b>	20	3,97

FONTE: Elaborado pelo Autor, 2018.

Os autores mencionados na Tabela 25 também realizaram ensaio de U/S em corpos de prova curados durante 28dias. Guimarães (2017) avaliou a perda de massa em matrizes com 5% e 25% de lodo de curtume, nessa pesquisa foram estudados os mesmos percentuais, porém com adição de RSL, para a porcentagem de 5% a presente pesquisa apresentou perda de massa 2,43% menor que a encontrada por Guimarães, dessa forma em relação ao teste de U/S o RSL reduz a perda de massa quando comparado ao lodo de curtume.

Guimarães (2017) percebeu que a porcentagem de U/S aumentou em 2,82% quando adicionado 20% a mais de resíduo, já Sousa (2017) em sua pesquisa só verificou o aumento de 0,27% de perda de massa, quando adicionou 20% a mais de resíduo industrial, Dias (2015) ao



variar a quantidade de resíduo em 15% obteve uma perda de massa em 2,18%. Em relação a essa pesquisa comparando a variação de 5% de RSL para 20% e RSL, representando um aumento de 15% de resíduo, resultou em um aumento em apenas 0,31% de perda de massa. Ao comparar esse resultado com o encontrado com outros autores, é possível perceber que tanto para o resíduo industrial, quanto para o resíduo sólido de laboratório a variação na perda de massa é mínima ao se variar a quantidade de resíduo.

Ainda de acordo com a Tabela 25 é possível perceber que a medida que a quantidade de resíduo aumenta a perda de massa também aumenta. Ficando comprovado que por menor que seja a variação, a relação porcentagem de resíduo e perda de massa é válida para qualquer tipo de resíduo sólido.

A Tabela 26 apresenta os resultados do ensaio de capacidade de absorção de água referente aos tratamentos do planejamento one-way.

Tabela 26. Respostas do ensaio de Capacidade de Absorção de Água.

<b>Experimento</b>	<b>Nível do Fator (% RSL)</b>	<b>CAA (%)</b>
<b>Exp.0</b>	0	7,67
<b>Exp.0</b>	0	6,58
<b>Exp.0</b>	0	7,97
<b>Exp.1</b>	5	5,89
<b>Exp.1</b>	5	5,94
<b>Exp.1</b>	5	5,87
<b>Exp.2</b>	20	6,27
<b>Exp.2</b>	20	6,36
<b>Exp.2</b>	20	6,62
<b>Exp.3</b>	35	6,68
<b>Exp.3</b>	35	7,02
<b>Exp.3</b>	35	6,45

LEGENDA: Exp- Experimento; RSL- Resíduo Sólido de Laboratório; CAA- capacidade de absorção de água.  
FONTE: Dados da pesquisa, 2018.

A Tabela 26 mostra que o tratamento que apresentou menor absorção de água foi o referente a matriz cimentícia com 5% RSL, com uma média de 5,90% CAA, para 20% de RSL foi obtida uma média de 6,42% CAA e para 35% de RSL uma média de 6,72% CAA, ou seja, quanto maior a porcentagem de RSL maior a capacidade de absorção de água, sendo assim, observa-se que a porcentagem de RSL tem influência na CAA.

A capacidade de absorção de água, variou em apenas 0,82% comparando a matriz com 5% e 35%, ou seja, variação de 30% de resíduo, apesar de ser uma variação considerável, a capacidade de absorção de água entre essas matrizes aumentou em apenas 0,82%.

Autores como Lisboa et.al (2012), Sgorlon (2017), Santos (2017) e Oliveira (2017) também encontraram resultados semelhantes, todos variaram a porcentagem de resíduo fixando o tempo de cura e verificaram que a medida que a porcentagem do resíduo aumentou a capacidade de absorção de água também aumentou.

Sgorlon (2017) confeccionou blocos de concreto incorporando 5% de resíduo sólido galvanoplastia e chegou a uma capacidade de absorção de água de 6,2%. Oliveira (2017) adicionou fibra de vidro aos corpos de prova, e também estudou a relação de 5% de resíduo com tempo de cura de 28 dias, este chegou a uma CAA de absorção na média de 16%.

Os resultados encontrados por esses autores, foram superiores aos encontrados nessa pesquisa para as mesmas condições de tempo de cura e porcentagem de resíduo, variando apenas o tipo de resíduo, contudo é possível perceber que o RSL teve um melhor desempenho, pois com 5% de resíduo a capacidade de absorção foi de 5,9%. Em relação ao resíduo galvanoplastial a CAA foi 0,3% menor e 10% menor em relação a fibra de vidro, sendo assim o RSL tem um melhor desempenho em relação a CAA quando comparado a outros resíduos.

Ainda é possível fazer uma comparação entre os resultados de resistência a compressão apresentados na Tabela 23 com os resultados de capacidade de absorção de água apresentados na Tabela 26 temos resultados coerentes com a literatura, pois a medida que a capacidade de absorção de água aumenta a resistência a compressão diminui, ou seja, quanto mais resíduo a porosidade nas matrizes se tornam maior e a resistência diminui.

Contudo os resultados obtidos nessa pesquisa encontram-se em conformidade à ABNT NBR 9778 – (1987), os quais apresentaram uma porcentagem em massa menor a 40%, sendo assim, os tratamentos foram aprovados nos critérios de integridade e durabilidade. Sendo aprovados nos ensaios de lixiviação e solubilização, estes materiais, serão aprovados como E/S e poderão ser utilizados para diversos fins.

#### *4.2.2. Avaliação da imobilização dos contaminantes*

O processo de E/S é uma técnica viável para tratar resíduos sólidos (Classe I) e convertê-lo a uma classe de menor periculosidade, ou seja, (Classe II). Para a avaliação de imobilização dos contaminantes, foi utilizado o ensaio de lixiviação e a partir do líquido lixiviado, foi determinada a concentração do metal cromo total.

A Tabela 27 apresenta as concentrações de cromo total determinado a partir do extrato lixiviado expressos em  $\text{mg.L}^{-1}$  e em conformidade com o limite máximo que é de  $5 \text{ mg.L}^{-1}$ , seguindo a ABNT NBR 10005/2004.

Tabela 27-Resposta da concentração dos metais no extrato lixiviação

<b>Experimento</b>	<b>Nível do Fator (% RSL)</b>	<b>Cromo(mg.L<sup>-1</sup>) LMP - 5 mg/l<sup>(1)</sup></b>
<b>Exp.0</b>	0	0,22
<b>Exp.0</b>	0	0,21
<b>Exp.0</b>	0	0,2
<b>Exp.1</b>	5	0,79
<b>Exp.1</b>	5	0,91
<b>Exp.1</b>	5	0,92
<b>Exp.2</b>	20	4,02
<b>Exp.2</b>	20	4,07
<b>Exp.2</b>	20	3,51
<b>Exp.3</b>	35	5,17
<b>Exp.3</b>	35	5,1
<b>Exp.3</b>	35	5

LEGENDA: Exp- Experimento; RSL- Resíduo Sólido de Laboratório.

Conforme a Tabela 27 os tratamentos utilizando as porcentagens de RSL de 5% e 20% obtiveram resultados satisfatórios da concentração de cromo total quando comparados ao LMP, Ressalta-se que, o tratamento com 5% de RSL obtiveram os menores resultados.

A concentração de cromo total no extrato lixiviado aumentou em média 0,66mg/l quando comparado a prova em branco com 0% de resíduo. Ainda de acordo com a Tabela 27 o tratamento com 20% foi imobilizado quanto ao cromo total apresentando concentração de 0,87mg/l, ou seja, a matriz cimentícia não apresenta perigo.

Ao analisar o tratamento com 35% de RSL observa-se que a concentração de cromo total está acima do limite máximo permissível para disposição no meio ambiente, com concentração de 5,09mg/l. Desse modo, esta matriz cimentícia encontra-se classificada como perigosa – Classe I.

Alguns autores também estudaram concentração do metal cromo de acordo com os limites para os ensaios de lixiviação e solubilização. Ferreira (2013) incorporou resíduo de pedra sabão e Escória com o tempo de cura também de 28 dias, porém o autor não afirma a quantidade de resíduo, de acordo com a Tabela 3 o metal cromo apresentou 0,061mg/l, resultado semelhante a incorporação de 5% de RSl estudado nessa pesquisa.

Comparando os resultados de lixiviação apresentados na Tabela 6 temos que Ivanov (2014) também fixou o tempo de cura e variou apenas a porcentagem de resíduo de 0,5% a 2,5% , porém ao incorporar apenas 2,5% de dicromato de potássio, a concentração de cromo total chegou a 7,7mg/l ultrapassando o LMP, já para a referente pesquisa conseguiu incorporar 20% de resíduo sem ultrapassar o limite, o fato se deve a quantidade de cromo incorporada e as

reações que ocorrem entre os ligantes e o resíduo, não apresentando afinidade capaz de imobilizar o contaminante.

Ueda *et.al* (2017) estudou o cromo presente no resíduo de curtume, o qual apresenta alta concentração de cromo, devido ao processo de produção de couro. Este autor variou a quantidade de resíduo adicionada a matriz de 0% a 2% , porém antes o resíduo passou por um tratamento de clarificação química com dois coagulantes diferentes e de acordo com as Tabela 7 e Tabela 8 temos que a quantidade de cada componente contribui positiva ou negativamente para o resultado da lixiviação, visto que a concentração de cromo aumentou ao utilizar o sulfato de alumínio para tratamento prévio.

Sgorlon (2017) comparado aos autores citados anteriormente foi o que mais incorporou resíduo a matriz cimentícia, porém menos que as porcentagens avaliadas nesta pesquisa, o autor variou as porcentagens de 2% a 10% de resíduo industrial. Assim como nessa pesquisa a medida que aumentou a quantidade de resíduo a concentração de cromo total também aumentou variando de 0,15mg/l a 0,24mg/l, porém o autor também avaliou outros metais e de modo geral os blocos fabricados também passaram por testes de solubilização.

De acordo com os testes de lixiviação Tabela 27 o tratamento com 35% de resíduo foi classificado como resíduo perigoso Classe I e de acordo com a Figura 12 será direcionado para aterro sanitário. As demais composições foram imobilizadas sendo classificadas como resíduo não perigoso Classe II e passaram por teste de solubilização para determinar se são inertes ou não inertes.

Visando classificar o material estabilizado como Classe IIA (Não Inertes) e IIB (Inertes) em conformidade à ABNT NBR 10004 (2004) e de acordo com a ABNT NBR 10006 (2004) a Tabela 28 apresenta as concentrações de cromo de acordo com o extrato lixiviado.

Tabela 28-Resposta da concentração dos metais no extrato solubilizado

<b>Experimento</b>	<b>Nível do Fator (% RSL)</b>	<b>Cromo(mg.L<sup>-1</sup>) LMP – 0,05 mg/l<sup>(1)</sup></b>
<b>Exp.1</b>	5	0,94
<b>Exp.1</b>	5	0,85
<b>Exp.1</b>	5	0,85
<b>Exp.2</b>	20	3,47
<b>Exp.2</b>	20	3,78
<b>Exp.2</b>	20	3,60
<b>Exp.2</b>	35	6,92
<b>Exp.2</b>	35	4,29
<b>Exp.2</b>	35	5,12

LEGENDA: Exp- Experimento <sup>1</sup> Parâmetros e limites máximos no extrato solubilizado conforme recomendação da ABNT NBR 10006 (2004).

De acordo com Tabela 28, as concentrações de cromo total no extrato solubilizado de todos os experimentos foram superiores ao LMP, conforme sugere a ABNT NBR 10004/ 2004.

Ferreira (2013) incorporou resíduo de pedra sabão a matrizes cimentícias com 28 dias de cura de acordo com a Tabela 4 e Tabela 5 o estudo realizado pelo referente autor conseguiu imobilizar o cromo.

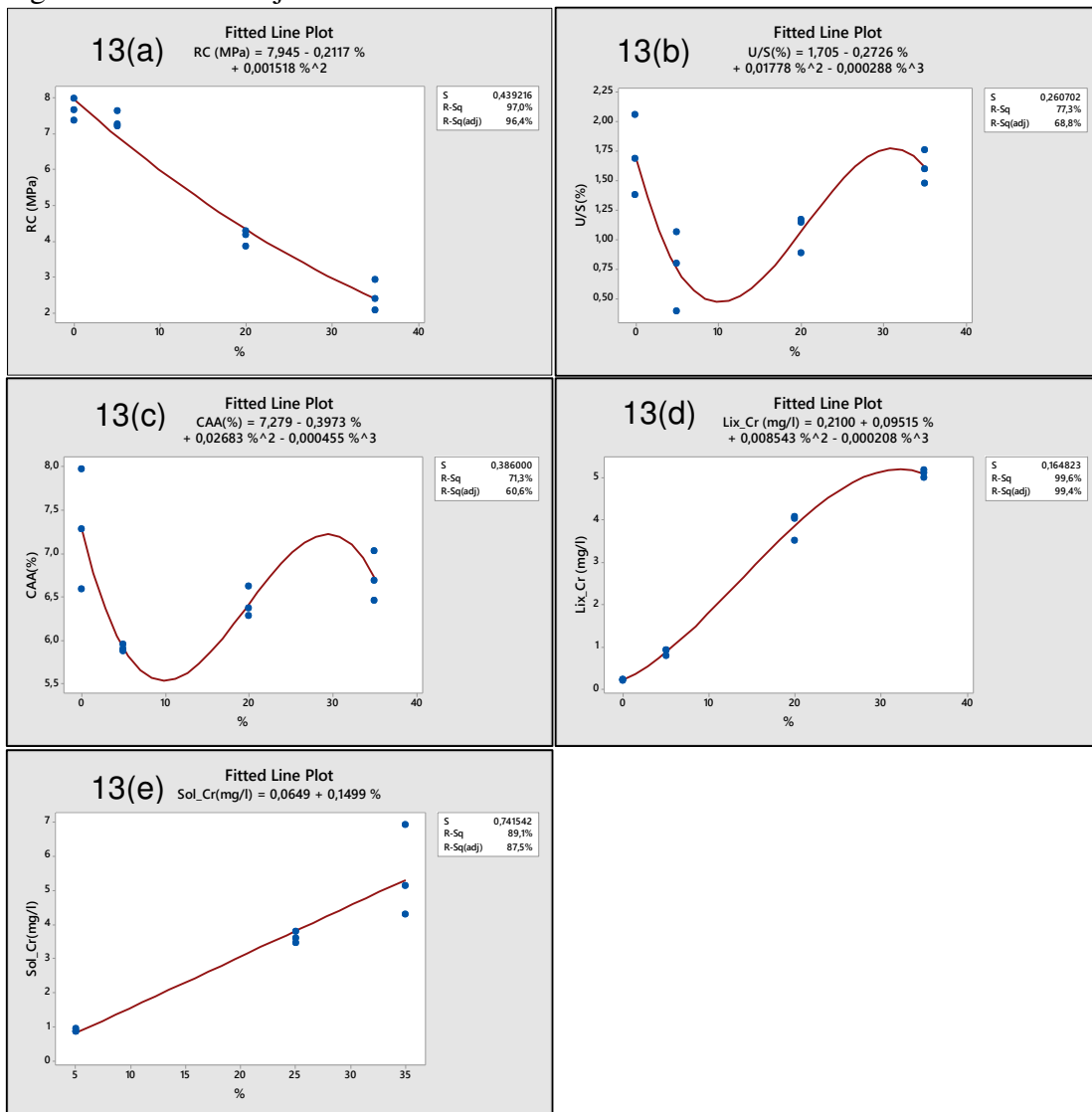
De acordo com a pesquisa de Sgorlon (2017) o cromo total também ultrapassou o limite, mesmo utilizando pequenas porcentagens como 2% de resíduo sólido industrial, ao incorporar 2% o teor de cromo total foi de 0,15mg/l, concentração superior ao estipulado pela legislação. Nessa pesquisa a menor porcentagem estudada foi de 5% com um teor de cromo total de 0,88mg/l, o autor mencionado variou a porcentagem 5 vezes chegando ao máximo de 10%, o qual também verificou o aumento da concentração de cromo a medida que aumentou a porcentagem.

Tem-se então que todas às matrizes cimentíceas foram reprovados no ensaio de solubilização, possibilitando classificá-los como sendo resíduos não inertes (Classe IIB).

#### 4.3. ANALISE ESTATISTICA DOS RESULTADOS

A Figura 13 apresenta os modelos ajustados com porcentagem de RSL variando em 0%, 5%, 20% e 35% com tempo de cura fixo de 28 dias. Nessas condições as variáveis respostas foram: resistência a compressão, umidificação e secagem, capacidade de absorção de água, lixiviação e solubilização.

Figura 13- Modelo Ajustado



FONTE: Minitab,2018

A Figura 13 apresenta os gráficos referentes ao comportamento da porcentagem de resíduo e as variáveis respostas. A Figura 13(a) mostra o modelo ajustado em relação a resistência a compressão, o modelo apresentou perfil quadrático representado pela equação 21.

$$\widehat{RC} (MPa) = 7,945 - 0,2117 \% + 0,001518 \% \quad (21)$$

A Figura 13 (b) representa o modelo cúbico para a análise de umidificação/secagem, o modelo cúbico foi o que melhor explicou os resultados baseado no parâmetro lack-of-fit que define a falta ou não de ajuste. A equação 22 define o modelo cúbico.

$$\widehat{U/S}(\%) = 1,705 - 0,2726 \% + 0,01778 \%^2 - 0,000288 \%^3 \quad (22)$$

A Figura 13 (c) é relativa ao estudo para capacidade de absorção de água, o modelo que melhor se ajustou aos dados também foi um modelo cúbico, estabelecido pela equação 23.

$$\widehat{CAA}(\%) = 7,279 - 0,3973 \% + 0,02683 \%^2 - 0,000455 \%^3 \quad (23)$$

O modelo de lixiviação do cromo é apresentado na Figura 13 (d), o qual seguiu um perfil para um modelo ajustado quadrático, indicado pela equação 24.

$$\widehat{Lix\_Cr} \text{ (mg/l)} = 0,2100 + 0,0952 \% + 0,00854\% ^2 - 0,000208\% ^3 \quad (24)$$

O único modelo que apresentou um comportamento linear está representado pela Figura 13 (e), referente a variável resposta solubilização, o modelo é determinado pela equação 25.

$$\widehat{Sol\_Cr} \text{ (mg/l)} = 0,065 + 0,1499 \% \quad (25)$$

A Tabela 29 apresenta os resultados das análises estatística referente aos modelos citados anteriormente em relação a significância do modelo, o coeficiente de determinação, a correlação entre as variáveis e a determinação máxima.

Tabela 29- Análise estatística

Variável Resposta	Valor P	R <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup> max
RC	0,000	97,04%	0,99	98,72%
U/S	0,006	77,31%	0,88	77,31%
CAA	0,015	71,32%	0,84	71,32%
Lix_Cr	0,005	98,78%	0,99	99,56
Sol_Cr	0,000	89,10%	0,94	89,61%

LEGENDA: RC- Resistência a Compressão, U/S – Umidificação e Secagem, CAA- Capacidade de Absorção de água, Lix\_Cr - Lixiviação Cromo, Sol\_Cr- Solubilização Cromo.

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

O modelo aplicado para a variável resposta RC consegue explicar no máximo R<sup>2</sup>max = 98,72%, contudo o modelo ajustado para 2º ordem conseguiu explicar 97,04% dos resultados, resultado este bastante satisfatório visto que P>0,05, ou seja, o modelo é significativo.

Tanto os modelos ajustados para U/S quanto para CAA conseguiram explicação máxima quando aplicado o modelo de 3º ordem. Para U/S os encontrados os seguintes resultados: R<sup>2</sup>max= 77,31% e R<sup>2</sup>= 77,31%, o modelo conseguiu explicar 77,31% dos resultados. Para a CAA R<sup>2</sup>max= 71,32%, ou seja, o máximo que o modelo consegue explicar é 71,32% e encontrado R<sup>2</sup>= 77,31%.

Comparando todos os coeficientes de determinação encontrados (R<sup>2</sup>), as análises que obtiveram os melhores modelos para explicação dos dados foram obtidos em relação os testes de resistência a compressão com R<sup>2</sup> = 97,04%, lixiviação de cromo total com R<sup>2</sup> = 98,78% para esses estudos o melhor ajuste se deu em modelos de 2º ordem.

De acordo com a Tabela 29, é possível ressaltar que além do modelo da RC, os modelos que atingem uma explicação máxima dos dados foram atribuídos às concentrações de cromo total dos extratos lixiviados e solubilizados. Para a análise de lixiviação o modelo explicou 0,78% menos que a explicação máxima de 99,56%; para a solubilização a variação foi ainda menor apresentando uma diferença de apenas 0,51%. Além desses resultados os modelos encontrados para as duas análises também podem ser considerados como ideais, pois os valores do teste “P” foram menores que 0,05 sendo assim os modelos são significativos.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 29 também é possível analisar a correlação entre a porcentagem de resíduo e as variáveis resposta. As análises que apresentaram maiores correlações com a porcentagem de resíduo foram de RC, Lix\_cr todos com  $R=0,99$ , ou seja correlação forte, para que a correção seja perfeita é necessário que o valor de R seja igual a 1. Os demais estudos também obtiveram resultados entre 0,75 e 1 representando uma correlação forte. A menor correlação encontrada foi,  $R=0,84$ , entre a porcentagem de resíduo e a capacidade de resíduo.

#### 4.4. DETERMINAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA E EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DOS CONTAMINANTES.

O balanço de massa baseia-se na Lei das Conservações das Massas, de Lavoisier. O balanço foi realizado em todos os tratamentos das matrizes cimentícias, as quais foram submetidas ao ensaio de lixiviação e, assim avaliou-se a eficiência do processo de E/S tratando o resíduo sólido de laboratório.

Para verificar a estabilidade dos contaminantes existentes nas matrizes cimentícias bem como a avaliação química das matrizes solidificadas, utilizou-se do balanço de massa. Este, por sua vez, foi realizado para o metal cromo total presente nos extratos lixiviados. De acordo com Leite (1997) e Brito (1999), para obter a eficiência do processo de E/S busca-se, inicialmente, o balanço de massa. Este, por sua vez, é realizado conhecendo a massa aplicada e a massa atenuada conforme a Equação 13.

A eficiência do processo é baseada em termos de retenção desses contaminantes nas matrizes cimentícias, e foi calculada a partir da Equação 11.

Na Tabela 30 encontram-se os valores médios das massas do processo de E/S das matrizes cimentícias de todos os tratamentos em relação ao cromo presente no extrato lixiviado para obter o balanço de massa e eficiência do processo.



Tabela 30. Balanço de massa e eficiência do processo de E/S no extrato lixiviado.

<b>Experimentos</b>	<b>Massa do RSL Bruto<sup>1</sup> (g)</b>	<b>Massa do Contam. Tratado<sup>2</sup> (g)</b>	<b>Massa do Contam. Ret<sup>3</sup>. (g)</b>	<b>Eficiência da Transformação (%)</b>
<b>Exp.1 (5%)</b>	199,70	1,56	198,14	99,27
<b>Exp.1 (5%)</b>	199,70	1,81	197,89	99,15
<b>Exp.1 (5%)</b>	199,70	1,79	197,91	99,16
<b>Exp.2 (20%)</b>	199,70	7,90	191,80	95,77
<b>Exp.2 (20%)</b>	199,70	8,01	191,69	95,71
<b>Exp.2 (20%)</b>	199,70	6,90	192,80	96,30
<b>Exp.3 (35%)</b>	199,70	10,15	189,55	93,88
<b>Exp.3 (35%)</b>	199,70	9,94	189,76	93,96
<b>Exp.3 (35%)</b>	199,70	9,76	189,94	94,08

LEGENDA: Exp-Experimento (1): Massa do resíduo sólido bruto; (2): Massa do contaminante tratado; (3): massa do contaminante retida na matriz.

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

De acordo com a Tabela 30, observou-se que os menores valores de massa lixiviada em relação ao contaminante tratado foram atribuídos às médias do tratamento utilizando 5% de RSL. Dessa forma os melhores resultados apresentados tanto para a massa retida de contaminante quanto, a eficiência do processo de E/S foram, também, apresentados pela média dos experimentos Exp.1 conseguindo reter em média 197,98g do contaminante, chegando a uma eficiência média de 99,19%.

De acordo com as porcentagens de incorporação de RSL estudadas, a retenção do cromo total no interior das matrizes cimentícias variou em média de 189,75g a 197,98g, sendo um processo inversamente proporcional, ou seja, a medida que a quantidade de resíduo aumenta diminui a capacidade de retenção do cromo total, conseqüentemente, mais cromo total é lixiviado.

Ainda de acordo com Tabela 30, apesar de ter havido um aumento na porcentagem de RSL e conseqüentemente uma redução na capacidade de retenção da concentração de cromo total, houve para todos os tratamentos uma eficiência média das experimentos Exp.1, Exp.2 e Exp.3 respectivamente de: 99,19%, 95,93% e 93,97%.

Guimarães (2017) também estudou a eficiência de retenção do cromo total em matriz cimentícia com tempo de 28 dias e porcentagem de resíduo de 5% e 25% , o resíduo estudado foi resíduo industrial, mas também continha o metal cromo. A maior eficiência também foi para a menor porcentagem de resíduo, porém a eficiência foi 16,7% menos eficiente que o estudo realizado nessa pesquisa.

Em relação a porcentagem de 20% de RSL foi obtida uma eficiência de 95,92%, já Guimarães(2017) em seu estudo obteve apenas 45% de eficiência, sendo assim o estudo desenvolvido é mais satisfatório quando comparado a outros processos.

#### 4.5. AVALIAÇÃO DE ROTAS PARA DESTINAÇÃO FINAL E UTILIZAÇÃO APÓS A ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO

Para determinar as rotas de destinação e utilização dos corpos de prova é necessário analisar se os mesmos foram aprovados no critério de integridade/durabilidade, ou seja, os ensaios de resistência à compressão), absorção de água e umidificação/ secagem foram satisfatórios. E no critério de imobilização dos contaminantes o qual refere-se aos testes de lixiviação e solubilização.

No critério integridade/durabilidade todos os tratamentos foram aprovados. Entretanto, no que diz respeito a imobilização os contaminantes, no extrato lixiviado apenas os Exp.3 foram reprovados, mas no extrato solubilizado todos os tratamentos foram reprovados conforme consta na Tabela 31.

Na Tabela 31 encontram-se a classificação dos materiais E/S levando em consideração os resultados de RC, CAA U/S e as médias das concentrações dos contaminantes presentes nos extratos lixiviados e solubilizados dos tratamentos das matrizes cimentícias.

Tabela 31. Classificação dos materiais E/S.

<b>MATERIAL</b>	<b>RC</b>	<b>CAA</b>	<b>U/S</b>	<b>LIX. Cromo</b>	<b>SOL. Cromo</b>	<b>CLASSE</b>
<b>T (5%)</b>	Apr.	Apr.	Apr.	Apr.	Rep.	Classe II A
<b>T (20%)</b>	Apr.	Apr.	Apr.	Apr.	Rep.	Classe II A
<b>T (35%)</b>	Apr.	Apr.	Apr.	Rep.	Rep.	Classe I

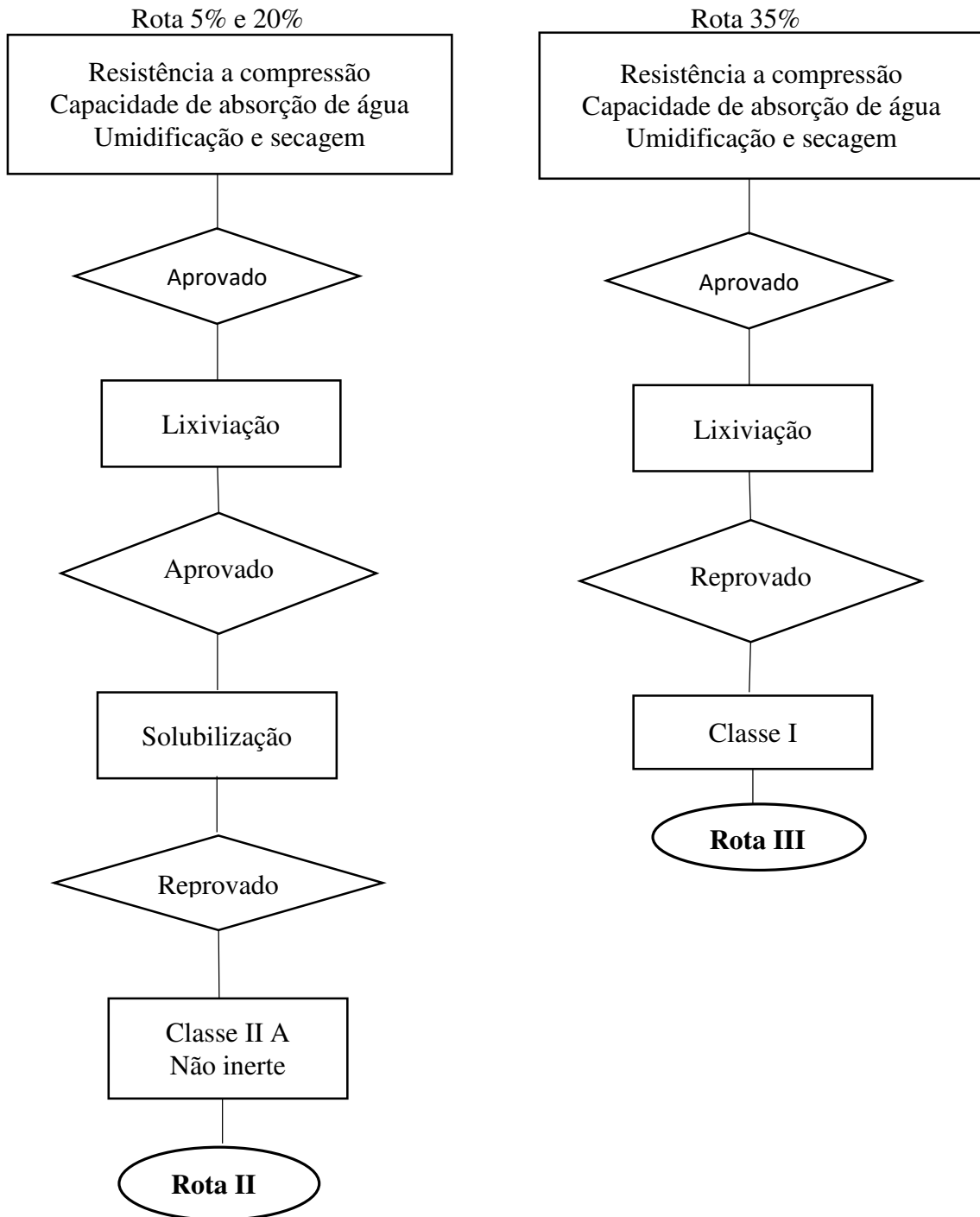
LEGENDA: Apr.: Aprovado; REP. Reprovado RC: resistência a compressão; CAA: Capacidade de absorção de água; U/S: Umidificação e secagem; lix: Lixiviação; Sol: Solubilização; Casse I (Perigoso: ABNT NBR 10004/2004a); 2: Classe II A (Não Perigoso - Não inerte: IIB (Não Perigoso – Inerte/10006/2004c).

FONTE: Dados da pesquisa, 2017.

De acordo com a Tabela 31 foi possível observar que, com exceção do tratamento com 35% de RSL todas as demais médias dos tratamentos permitiram classifica-los como sendo resíduos sólidos não inertes, ou seja, não perigoso e não inerte- Classe IIA . Diante disso, vale ressaltar que submeter tanto o RSL quanto o cimento previamente classificados como sendo resíduos perigosos (Classe I) a tratamento de E/S é, sem dúvida uma prática eficiente, uma vez que possibilitou a incorporação de grande parte do contaminante.

De acordo com os testes de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes é possível determinar a rota de destinação. Com base na Figura 12 determinou-se as rotas para as matrizes com 5%, 20% e 35% de resíduo, apresentadas na Figura 14.

Figura 14- Fluxograma de Rotas de destinação final



FONTE: Própria,2018

Como mostrado na Figura 14 a matriz com 35% de RSL que foi aprovada no critério de integridade e durabilidade, mas reprovada no teste de lixiviação, tendo a rota III como destino final, que se refere ao aterro sanitário.

As matrizes com 5 % e 20% de resíduo sólido de laboratório chegaram a rota II, de acordo com o Protocolo de avaliação de materiais E/S proposto por Brito(2007) são classificadas com utilização com restrição, este encaminhamento acontece quando o material foi aprovado nos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e umidificação/secagem, e no ensaio de lixiviação, mas reprovado no ensaio de solubilização. Essas matrizes cimentícias apresentam restrição referente a faixas de resistência a compressão, as quais determinam o destino desse material.

As matrizes com incorporação de 5% de RSL apresentaram resistência média de 7,36MPa, de acordo com as faixas apresentadas na tabela 16 tem- se que essa resistência aplica a: Uso como material termoplástico e como bloco vazado em concreto comum. Para o tratamento com 20% de RSL obteve resistência na faixa de 4,09 MPa, essa resistência se aplica a materiais com uso termoplástico, base para pavimentação e tijolo maciço.

## CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo realizar a avaliação do metal cromo presente no resíduo sólido de laboratório, realizando um estudo para incorporação e imobilização do contaminante dentro dos limites máximos. Também foi realizado o estudo das rotas e aplicações para cada porcentagem incorporada. Sendo assim, pode-se concluir que:

- Todos os tratamentos foram aprovados nos testes de integridade e durabilidade, os melhores resultados se deram para o tratamento com 5% de incorporação de resíduo.
- Todos os tratamentos do planejamento, apresentaram resistência à compressão superior a 1 MPa, a maior resistência se deu para o teste com 5% de incorporação de resíduo sólido passivo de laboratório.
- O teste de lixiviação foi satisfatório para as incorporações de 5% e 20% para o teste de 35% o teste não foi aprovado, porém ficou acima do limite máximo com apenas 0,09mg/l.
- A menor eficiência de retenção dos contaminantes no extrato lixiviado foi atribuída ao tratamento com 35% de resíduo sólido de laboratório, a maior foi atribuída ao tratamento que incorporaram 5% de resíduo sólido de laboratório.
- As matrizes cimentícias com 5% e 20% seguem a rota II de destinação, e 35% rota III, ou seja aterro sanitário. Baseado na resistência a compressão incorporação de 5% de RLS poderá ser usada como material termoplástico e como bloco vazado em concreto comum e os blocos com 20% servirá de material com uso termoplástico, base para pavimentação e tijolo maciço.
- Todos tratamentos apresentaram uma ótima eficiência de retenção do cromo total. Apesar de matriz cimentícia com 35% a concentração de cromo total ter ficado acima do LMP, a eficiência de retenção chegou a uma média de 93,97%.

## SUGESTÕES FUTURAS

- Desenvolver um plano de gerenciamento para os resíduos gerados pelos laboratórios de engenharia química.
- Estudar um pré-tratamento do resíduo, para que quando adicionado em porcentagens  $\geq 35\%$  obtenham um aprisionamento eficaz.
- Confeccionar matrizes estudando outros fatores, como tipo de cura e temperatura.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.005  
**Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004:  
**Classificação de Resíduos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006  
**Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281 **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos.** Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 **Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9781: **Peças de concreto para pavimentação: especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9781 - **Peças de concreto para pavimentação- Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.
- ABREU, D. G.; IAMAMOTO, Y. Relato de uma experiência pedagógica no ensino de química: formação profissional com responsabilidade ambiental. **Química Nova**, V. 26, n. 4, p.582-584, 2002.
- ALMEIDA, Hugo. **Método para incremento da solubilidade de substâncias activas pouco solúveis (BCS – Classe II).** 111 f. Dissertação de mestrado – Faculdade de Farmácia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009. Disponível em:

<http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/1868/1/Tese%20de%20Mestrado.pdf>. Acesso em: 17.MAIO 2017.

ALMEIDA, Kayrone Marvila de; VIDAL, Francisco Wilson Hollanda; CASTRO, Nuria Fernández. **Utilização Do Resíduo De Caulim Na Composição Do Concreto**. In: XXV JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E I JORNADA DE INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, 25. 2017.

ARAÚJO, Lucas *et al.* **Desenvolvimento De Geopolímeros A Partir De Resíduo De Construção Como Agregado**. In: 8º FORUM INTERNACIONAL DE RESIDUOS SÓLIDOS, 8., 2017, Curitiba.

AZEVEDO, Ricardo A. and LEA, Peter J.. **Preface: Toxic metals in plants**. Braz. J. Plant Physiol [online]. 2005, vol.17,n.1, pp. 1-1. ISSN 1677-0420.

BENHAMMOU, A.; YAACOUBI, A.; NIBOU, L.; TANOUTI, B. Chromium (VI) **Adsorption from Aqueous Solution onto Moroccan Al-pillared and Cationic Surfactant Stevensite**. Journal of Hazardous Materials, v. 140, p. 104-109, 2007.

BENTO, Waleska de Araújo Siqueira; PAIM, Ana Paula Silveira. Tratamento dos resíduos de cobre, prata, chumbo, cromo e permanganato de potássio gerados em laboratório de ensino de Química da UFPE. **Ambiência Guarapuava (PR)** v.11 n.1 p. 237 - 246 Jan./Abr. 2015 ISSN 1808 – 0251 DOI:10.5935/ambiencia.2015.01.14nt. Acesso em: 19 fev. 2017.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 30 Mar.2017

BREHM, Feliciane. A. **Adição de óxido de zinco (ZnO) em pastas de cimento visando viabilizar a reciclagem de pós de aciaria elétrica (PAE) na construção civil**. 2004. 90 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

BRITO, André Luiz Fiquene de. **Protocolo de avaliação de materiais resultantes da estabilização por solidificação de resíduos**. 2007. 179 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BRITO, André Luiz Fiquene de; SOARES, Sebastião Roberto. **Avaliação da integridade e da retenção de metais pesados em materiais estabilizados por solidificação**. Eng Sanit Ambien, v. 14, n. 1, p.39-48, 2009.

CAETANO, Uliana Argente. **Reaproveitamento do resíduo Terra da Shredder através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland para aplicação na construção civil**. 2016. 102 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

CAMPOS, M. A. **Análise microestrutural e das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas e concretos com Isoladores elétricos de porcelana**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas-SP, 2011.

CONAMA – **Resolução CONAMA n. 313 – Gestão de Resíduos Perigosos**. Ministério do Meio Ambiente. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 22 de novembro de 2002.

CONAMA – **Resolução CONAMA n. 430** - Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes. Ministério do Meio Ambiente, altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil 13 de maio de 2011.

CONAMA n. 307, de 5 de julho de 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 12 fev. 2017.

CONNER, J.R. *Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes*. New York. Van Nostrand Reinhold, 1990.



COSTA, F. X. et al. Estudo qualitativo dos resíduos sólidos do campus I da Universidade Estadual da Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 1519-1528, 2004. Acesso em: 19 fev. 2017

DIAS, Joelma. **Otimização e limites de avaliação ambiental de materiais estabilizados por solidificação após a incorporação de borra oleosa de petróleo.** 2015. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química)- Universidade Federal de Campina Grande.

FERREIRA, Welington Luiz. 2013 **Adição de resíduos do setor minero-metalúrgico na fabricação de tijolos solo-cal [manuscrito]** / 67f.: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.

GERBASE, A. E. et al. Gerenciamento de resíduos químicos em instituições de ensino e pesquisa. **Revista Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 1, jan./fev. 2005. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422005000100001](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422005000100001)>. Acesso em: 25 fev. 2017.

GUIMARÃES, Adriana Valéria Arruda. **Cinética dos Contaminantes e Otimização da Estabilização por Solidificação de Lodo de Curtume.** 2017. 186 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

GUIMARÃES, Diane Leal. **Tratamento de Lodo Primário de Estação de Tratamento de Efluentes e Aplicação de Protocolo de Avaliação.** 2008. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

IMBROISI, Denise et al. GESTÃO DE RESÍDUOS QUÍMICOS EM UNIVERSIDADES: UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA EM FOCO. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 2, p.404-409, 2006.

ISAIA, G. E. E. A. **Concreto: Ensino.** IBRACON, 2011. Disponível em: <[www.ime.eb.br/~moniz/matconst2/cimento\\_portland.pdf](http://www.ime.eb.br/~moniz/matconst2/cimento_portland.pdf)>. Acesso em: 16 Outubro 2017.

IVANOV, Raphael Coelli. **Influência Do Dicromato De Potássio No Comportamento Do Cimento Aluminoso Visando Ao Processo De E/S De Resíduos Com Cromo.** 2014. 165 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

JARDIM, Wilson de Figueiredo. Gerenciamento de resíduos químicos em laboratórios de ensino e pesquisa. **Revista Química Nova**, v.21, n.5, p. 671-673, 1998,;

KOTÁS, J.; STASICKA, Z. **Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation. Environmental Pollution**, v. 107, p. 263-283, 2000.

KULAKOWSKI, Marlova Piva et al. Avaliação Ambiental de Produtos e Sistemas Construtivos Inovadores com Resíduos: Lixiviação e Solubilização. **Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade**, p.37-76, 26 jul. 2016. Editora Scienza. <http://dx.doi.org/10.5935/978-85-5953-005-6.2016c003>. Acesso em: 25 mar. 2017.

LEITE, Valderi Duarte. **Processo de tratamento anaeróbio de resíduos sólidos urbanos inoculados com lodo de esgoto industrial**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos-SP, Universidade de São Paulo, 1997.

LIMA, Ana Paula Cardoso Kawabe de. **Análise de resíduos químicos como subsidio para implementação de um programa de gerenciamento na Universidade Federal de Lavras**, UFLA. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

LISBOA, Juliana Soares; BINI, Marcos Paulo Minussi; ANTUNES, Maria Lúcia Pereira. III-006 – Estudo Da Incorporação De Resíduos Da Fabricação De Pás Eólicas Para Aerogeradores Em Cimento Portland. In: **26º Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária e Ambiental**, Sorocaba. Alto da Boa Vista, 2012. p.

MEHTA, P. K., Monteiro, P. J. **Concreto - Estrutura, Propriedades e Materiais**. IBRACON, ed.3, São Paulo (1994).

MELCHERT, Maura. B. M. **Solidificação e estabilização de resíduos de catalisadores contendo níquel e alumínio em cimento Portland**. 2012. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Escola Politécnica. São Paulo, 2012.

MENDES, Luiz Antonio Arnaud. **Sistema de gerenciamento integrado de resíduos perigosos: modelagem e validação nos Laboratórios da Universidade do Estado do Rio de Janeiro** –UERJ, 2011.

MESQUITA, L. P. **Avaliação da Fixação de Metais Pesados em Matrizes Cimentícias.** 2008, 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MOHAN, D.; SINGH, K. P.; SINGH, W. K. **Removal of hexavalent chromium from aqueous solution using low-cost activated carbons derived from agricultural waste materials and activated carbon fabric cloth.** *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 44, p. 1027-1042, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2. ed. São Paulo - SP: PINI, 1997.

NOVAIS, R. F. **Tópicos em ciência do solo.** V. 1. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000.

OHLWEILER, O.A., **Química Inorgânica.** vol. II, Edgard Blücher LTDA, São Paulo-SP, 1973.

OLIVEIRA JUNIOR, Francisco de Assis. **Implantação do Programa de Gerenciamento de Resíduos Químicos: Caso da Universidade Federal de Lavras.** 2012. Dissertação (Mestrado) -Universidade Federal de Lavras., Lavras, 2012.

OLIVEIRA, P. H. M. **Influência da adição de resíduos cerâmicos nas propriedades mecânicas do concreto.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Formiga. Formiga, 2014. 84 p.

OLIVEIRA, Paulo Silas. **Caracterização do resíduo de resina epóxi com fibra de vidro proveniente da fabricação de pás eólicas e sua incorporação em argamassa de cimento Portland,** Dissertação (Mestrado)– Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2017.

PENATTI, Fabio Eduardo, GUIMARÃES, Solange T. Lima; SILVA, Paulo Marcos da. **Gerenciamento de resíduos químicos em laboratórios de análises e pesquisa: o desenvolvimento do sistema em laboratórios da área química.** São Paulo: Siades, 2011.

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/política-de-residuos-solidos>. Acesso em 12 de outubro de 2016.

PORTLAND, Associação Brasileira de Cimento. Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público. **Associação Brasileira de Cimento Portland** – ABCP, São Paulo, 2010. 36p.

REICHERT, G. A.; TEIXEIRA, C. E. Plano de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos. **In: Transversal: capacitação de gestores em saneamento ambiental;** orgs. Alexandra Rodrigues Finotti, Vania Elisabete Schneider, Joice Cagliari, Caxias do Sul, RS: RECESA, 2009. 345 p.

RIBEIRO, D. V., YUAN, S. Y., MORELLI, M. R. Efeito da adição de serragem de couro tratada quimicamente nas propriedades do cimento Portland. *Química Nova*, v.34, p.979 – 983, 2011.

ROCHA, Clarice Oliveira da; GADELHA, Antonio José Ferreira; BRITO, André Luiz Fiquene de. **Estudo Da Tecnologia De Estabilização Por Solidificação (E/S) Através De Ensaio De Integridade E Durabilidade.** In: Seminário Da Região Nordeste Sobre Resíduos Sólidos, 2010. p. 1 - 5.

ROCHA, Clarice Oliveira da; RAMOS, Amanda de Paula; BRITO, André Luiz Fiquene de. **Avaliação Da Integridade E Durabilidade Do Resíduo Sólido Sintético Através Da Estabilização Por Solidificação.** 2010.

ROJAS, J. W. J., HEINECK, K. S., CONSOLI, N. C. **Resistência à compressão simples de um solo contaminado e cimentado.** *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n.13, UFRGS: 2009.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. dos S. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, jan./mar. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

SANTOS, Berenice Aparecida dos; SOUZA, Geane Ap.. **Descarte de resíduos de laboratório química biologia.** Colegio Est. Francisco Carneiro Martins, Guarapuava, 2013. Disponível em:

<[http://www.nre.seed.pr.gov.br/arquivos/File/guarapuava/eudcacao\\_profissional/descartes\\_residuos.pdf](http://www.nre.seed.pr.gov.br/arquivos/File/guarapuava/eudcacao_profissional/descartes_residuos.pdf)>. Acesso em: 04 mar. 2017.

SANTOS, Osvaldo Cruz. **Formulação de bloco intertravado cerâmico com adição de resíduos urbanos e industriais**. 2013. 178 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SCHNEIDER, Vanessa Tressoldi. **Gerenciamento de resíduos no centro universitário univates**, 2014.

SGORLON, Juliana Guerra; BERTOLI, Renan Felipe; GOMES, Maria Carolina Sérgi. **Utilização De Resíduo Sólido Industrial Na Fabricação De Blocos De Concreto Para Pavimentação: Estudo Do Comportamento Físico, Químico E Mecânico Da Matriz Cimentícia**. In: 8º FORUM INTERNACIONAL DE RESIDUOS SÓLIDOS, 8., 2017, Curitiba.

SILVA, Marcos André do Rego. **Solidificação e estabilização de resíduos inorgânicos industriais: estudo da eficiência do processo e evidência de mecanismos de imobilização**. 2007. 110f. Tese (Doutorado em Química). Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

SILVA, J. M. da et al. GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS LABORATORIAIS: A EXPERIÊNCIA DO PROGERE-UFC. **Extensão em Ação**, Fortaleza, v. 1, n. 8, p.99-107, Jan/jul. 2015.

SILVA, Enedina Aíra Alves da et al. **Gestão de resíduos sólidos na construção civil**. In: 13. VII CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL CAMPINA GRANDE/PB, 2016, Campina Grande.

SILVA, Thais Marques; OLIVEIRA JR., Edmilson Raimundo; AGRA, Tiago ; MONTEIRO, Eliana Cristina Barreto. **Análise Do Desempenho Mecânico Em Argamassas A Partir Do Uso De Agregado Reciclado De Concreto Em Substituição Ao Agregado Miúdo Natural**. In: CONPAR2017, Recife. Publicado em: 10/08/2017.

SOUSA, Sabrina Maia. **Avaliação da integridade de materiais solidificados e incorporados com resíduo sólido industrial caulim em matriz de cimento**. 2017. TCC(Graduação)- Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grand, Campina Grande, 2017.

SOUSA, Wellison Andrade de. **Tratamento de Resíduo Sólido Perigosos Contendo Cromo Através do Processo de Estabilização por Solidificação**. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

SOUZA, Max José Belo de. Toxicidade dos Metais Pesados, Researchgate. Nov.2016

SPENCE, R.D; SHI,C. **Stabilization and solidification of hazardous, radioactive and mixed wastes**. Boca Raton, Florida. Ed. CRC Press, 2005, p. 378.

STEGEMANN, J.A.; BUENFELD, N.R. **Predication of unconfined compressive strength of cement paste containing industrial wastes**. *Wastes management*. v. 23, 2003, p. 321-332.

TAVARES, Glauco Arnold; BENDASSOLLI, José Albertino. Implantação De Um Programa De Gerenciamento De Resíduos Químicos E Águas Servidas Nos Laboratórios De Ensino E Pesquisa No Cena/Usp. *Química Nova*, Vol. 28, No. 4, 732-738, 2004.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Metais pesados: o principal fator limitante para o uso agrícola de biossólidos das estações de tratamento de esgotos**. In.: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 20, 1999b. p.753-761. Rio de Janeiro, RJ. Anais. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

UEDA, Ana Cláudia; RUBILAR, Cirdelene Sincoski; JABUR, Andrea Sartori. **Avaliação da lixiviação de cromo e alumínio em matriz cimentícia contendo lodo de curtume tratado com coagulante  $pg\alpha 21ca$  e sulfato de alumínio**. In: 8º FORUM INTERNACIONAL DE RESIDUOS SÓLIDOS, 8., 2017, Curitiba.

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. Coleta de resíduos. Disponível em: <[https://www.ufmg.br/dlo/residuos\\_coleta.shtml](https://www.ufmg.br/dlo/residuos_coleta.shtml)>. Acesso em: 10 fev. 2017.

UMESH, K. G.; KAUR, M. P.; GARG, V. K.; SUD, D. **Removal of hexavalent chromium from aqueous solution by agricultural waste biomass**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 140, p. 60-68, 2007.

WILES, C.C. A Review of solidification/stabilization technology. *Journal of Hazardous Materials*, n.14,p.5-21,1987.

## APENDICE A – Ensaio de Lixiviação: ABNT NBR 10.005, 2005

### A - Ensaio de lixiviação/extração: NBR 10.005 de 2004

#### I - Material utilizado

##### a) Vidraria e Equipamentos

- Agitador rotatório de frascos
- Astatas magnéticas
- Medidor de pH com divisões de 0,01 unidades da escala de leitura
- Aparelho de filtração pressurizado ou à vácuo com filtro de fibra de vidro isento de resinas e com porosidade de 0,6 µm a 0,8 µm
- Peneira com abertura de 9,5 mm
- Balão volumétrico de 1 L
- Béqueres de 50 e 500 mL
- Fita de politetrafluoretileno (PTFE)
- Aparelho de Lixiviação

##### b) Reagentes

- Água destilada e/ou deionizada, isenta de orgânicos
- Ácido Clorídrico, 1,0 N
- Ácido Nítrico, 1,0 N
- Hidróxido de Sódio, 1,0 N
- Ácido Acético Glacial, p.a
- Soluções de extração 1 e 2.

#### II Procedimento

##### Primeira etapa:

A primeira etapa do procedimento consiste em determinar a solução de extração.

Neste caso, pesar 5,0 g (partículas < 9,5 mm) em um béquer de 250 ml. Adicionar 96,5 ml de água desionizada, cobrindo o mesmo com vidro de relógio, sob agitação em um agitador magnético por 5 minutos. Medir o pH.

pH=.....

Se o pH  $\leq$  5,0 usar solução de extração número 1;

Se o pH > 5,0, adicionar 3,5 ml de HCl 1 N. Homogeneizar a solução, cobrir com vidro de relógio e aquecer a 500 C durante 10 minutos. Esfriar. Se o pH for  $\leq$  5,0, utilizar a solução de extração número 1 e se for > que 5,0 usar a solução de extração número 2.

##### Segunda etapa:

**Solução extratora**

- Solução número 1: Adicionar 5,7 ml de ácido acético glacial a água preparada (1 L) e adicionar 64,3 ml de NaOH 1,0 N. O pH desta solução deve ser  $4,99 \pm 0,05$ ;

pH = .....

- Solução número 2: Adicionar 5,7 ml de ácido acético glacial a água preparada (1:1). O pH desta solução deve ser  $2,88 \pm 0,05$ .

- Pesquisar uma amostra do resíduo de  $100 \pm$  gramas, cuja granulometria tenha passado pela peneira padrão de 9,5 mm e colocar no vidro de extração;

- Em seguida adicionar lentamente a quantidade do fluido de extração apropriado ao recipiente (solução de extração 1 ou solução 2) extrator, conforme preparação anterior. A solução de extração deve ser 20 vezes (1:20) a massa utilizada (100g). Neste caso, basta apenas completar o volume para 2 L da solução de extração 1 ou 2;

- Fechar o vasilhame de extração firmemente, utilizando fita PTFE para evitar vazamento. Prender o vidro no aparelho de agitação rotativa, iniciar a agitação a  $30 \pm 2$  rpm por  $18 \pm 2$  horas. A temperatura ambiente deve ser mantida a  $23 \pm 2$  °C durante o período de extração;

- O tempo de extração é de  $18 \pm 2$  horas, no final deste período o material é separado do recipiente de extração em suas fases de componente, líquido e sólido, filtrando através de um filtro de fibra de vidro de 0,6 a 0,8  $\mu$ m.

- Medir o pH do extrato lixiviado;

pH =.....

Preservar as amostras do lixiviado para as análises, expressando os mesmos em mg.L-1. ou mg.kg-1

Obs.:

Massa do resíduo:..... g

Volume lixiviado:..... g

Código da(s) Amostra (s): .....



## APENDICE B – Memória de Cálculos dos Corpos de prova

As matrizes cimentíceas foram confeccionadas para corpos de prova (CP) de 450g e um traço de 1:5, com variados tempos de cura e porcentagem de resíduo sólido de laboratório. Neste caso, utilizou-se de 1 parte de cimento e 5 parte de aglomerantes, a qual será de 375 g de aglomerantes.

### Para 5% de RSL dias realizou-se os seguintes cálculos:

- Massa do cimento (CPC): Massa do Corpo de prova (CP)/6  
 Massa do CPC = 75g de cimento
- Massa do RSL (mL) = mCPC x porcentagem de RSL  
 Massa do RSL = 75 x 5%  
 Massa do RSL = 3,8 RSL
- Massa de brita (mL) = Magl. x 30%  
 Massa de brita = 375 x 30%  
 Massa de brita = 112,5
- Massa de areia (mA) = Magl. – Mrsl- Mb  
 Massa de areia = 375 – 3,8 - 112,5  
 Massa de areia = 258 g de areia.

### Para 15% de RSL dias realizou-se os seguintes cálculos:

- Massa do cimento (CPC): Massa do Corpo de prova (CP)/6  
 Massa do CPC = 75g de cimento
- Massa do RSL (mL) = mCPC x porcentagem de RSL  
 Massa do RSL = 75 x 15%  
 Massa do RSL = 11,3 RSL
- Massa de brita (mL) = Magl. x 30%  
 Massa de brita = 375 x 30%  
 Massa de brita = 112,5
- Massa de areia (mA) = Magl. – Mrsl- Mb  
 Massa de areia = 375 – 11,3 - 112,5  
 Massa de areia = 251,3 g de areia.

**Para 20% de RSL dias realizou-se os seguintes cálculos:**

- Massa do cimento (CPC): Massa do Corpo de prova (CP)/6  
Massa do CPC = 75g de cimento
- Massa do RSL (mL) = mCPC x porcentagem de RSL  
Massa do RSL = 75 x 20%  
Massa do RSL = 15,0 RSL
- Massa de brita (mL) = Magl. x 30%  
Massa de brita = 375 x 20%  
Massa de brita = 112,5
- Massa de areia (mA) = Magl. – Mrsl- Mb  
Massa de areia = 375 – 15 - 112,5  
Massa de areia = 247,0 g de areia.

**Para 30% de RSL dias realizou-se os seguintes cálculos:**

- Massa do cimento (CPC): Massa do Corpo de prova (CP)/6  
Massa do CPC = 75g de cimento
- Massa do RSL (mL) = mCPC x porcentagem de RSL  
Massa do RSL = 75 x 30%  
Massa do RSL = 22,5 RSL
- Massa de brita (mL) = Magl. x 30%  
Massa de brita = 375 x 30%  
Massa de brita = 112,5
- Massa de areia (mA) = Magl. – Mrsl- Mb  
Massa de areia = 375 – 22,5 - 112,5  
Massa de areia = 240,0 g de areia.

**Para 35% de RSL dias realizou-se os seguintes cálculos:**

- Massa do cimento (CPC): Massa do Corpo de prova (CP)/6  
Massa do CPC = 75g de cimento
- Massa do RSL (mL) = mCPC x porcentagem de RSL  
Massa do RSL = 75 x 35%  
Massa do RSL = 26,25 RSL

- Massa de brita (mL) = Magl. x 30%  
Massa de brita = 375 x 30%  
Massa de brita = 112,5
- Massa de areia (mA) = Magl. – Mrsl- Mb  
Massa de areia = 375 – 26,25 - 112,5  
Massa de areia = 236,0 g de areia.