



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



Josevânia Rodrigues Jovelino

**TRATAMENTO DE RESÍDUO SÓLIDO DE LABORATÓRIO POR ESTABILIZAÇÃO
POR SOLIDIFICAÇÃO E BALANÇO DE MASSA DOS METAIS PESADOS CÁDMIO
E NÍQUEL**

Dissertação de Mestrado

Campina Grande - Paraíba

Outubro de 2018

JOSEVÂNIA RODRIGUES JOVELINO

**TRATAMENTO DE RESÍDUO SÓLIDO DE LABORATÓRIO POR ESTABILIZAÇÃO
POR SOLIDIFICAÇÃO E BALANÇO DE MASSA DOS METAIS PESADOS CÁDMIO
E NÍQUEL**

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

Colaboradora: Profa. Dra. Ana Cristina Silva Muniz

Campina Grande - Paraíba.

Outubro de 2018

J86t Jovelino, Josevânia Rodrigues.

Tratamento de resíduo sólido de laboratório por Estabilização por Solidificação e balanço de massa dos metais pesados Cádmio e Níquel / Josevânia Rodrigues Jovelino. – Campina Grande, 2018.

91 f. : il. color.

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

"Orientação: Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito, Profa. Dra. Ana Cristina Silva Muniz".

Referências.

1. Resíduos Sólidos. 2. Lixiviação. 3. Balanço de Massa. I. Brito, André Luiz Fiquene de. II. Muniz, Ana Cristina Silva. III. Título.

CDU 628.54(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 JOSEVÂNIA RODRIGUES JOVELINO

TÍTULO: Tratamento de Resíduo Sólido de Laboratório por Estabilização
por Solidificação e Balanço de Massa dos Metais Pesados Cádmio e Níquel.

COMISSÃO EXAMINADORA

CONCEITO

Prof. André Luiz Figueira de Brito (Doutor)


(Orientador)



Prof. Heleno Dispo da Silva Júnior (Doutor)


(Examinador Interno)



Prof. Everton Ranny Fereira dos Santos (Doutor)


(Examinador Externo)



Campina Grande, 31 de outubro de 2018

Dedico este trabalho aos meus pais, Josefa Rodrigues e Joaquim Jovelino. Pelo incentivo, dedicação e empenho em todas as etapas de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por todas as graças alcançadas em minha vida, por guiar todos os meus passos e por todos os objetivos alcançados, incluindo a conclusão do mestrado em Engenharia Química.

À minha família, minha mãe Josefa Rodrigues, meu pai Joaquim Jovelino e ao meu irmão Jocielys Jovelino, por estarem ao meu lado em todos os momentos, me incentivando e encorajando em todas as etapas da minha vida.

Ao Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito, por depositar sua confiança, compreensão, orientação, e por me acolher com tamanha receptividade, além de dispor de recursos para o desenvolvimento de todas as etapas deste trabalho.

Ao Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos (LABGER) pela oportunidade de realização de toda a pesquisa sob a orientação do professor André Fiquene e com a colaboração significativa da professora Ana Cristina Muniz.

Ao CNPq pela manutenção das bolsas e produtividade em pesquisa.

A toda equipe do LABGER, pelo carinho, receptividade e aptidão em ajudar, em especial a Poliana e a Fernanda, que contribuíram de forma direta para a conclusão deste trabalho.

Agradeço a todos os professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Química e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química por todos os conhecimentos transmitidos, e a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação acadêmica.

“As tuas mãos me fizeram e me formaram; dá-me entendimento para aprender os teus mandamentos.” - Salmos 119:73

RODRIGUES JOVELINO, Josevânia. **Tratamento de resíduo sólido de laboratório por Estabilização por Solidificação e balanço de massa dos metais pesados Cádmio e Níquel**. 2018. 91p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2018. Orientador: Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito.

RESUMO

As Instituições de Ensino Superior representam um problema relacionado ao tratamento e à disposição final dos resíduos gerados em seus laboratórios. O objetivo desta pesquisa consistiu em realizar o tratamento do Resíduo Sólido de Laboratório (RSL) através do processo de Estabilização por Solidificação (E/S) e aplicar o balanço de massa aos metais Cádmio e Níquel, para averiguar se houve atenuação dos contaminantes presentes. A primeira etapa da pesquisa consistiu na caracterização e classificação do RSL, cimento, areia e brita. Posteriormente, realizou-se um planejamento experimental *one-way* utilizando como fator a porcentagem de RSL e as variáveis respostas estudadas foram a Resistência à Compressão (RC), Capacidade de Absorção de Água (CAA), Umidificação/Secagem (U/S) e Lixiviação. Em seguida foram confeccionados os corpos de prova para 10%, 30% e 45% de RSL, onde foram realizados os testes de integridade, durabilidade e imobilização dos contaminantes. Por fim realizou-se a análise estatística dos dados, o balanço de massa e o cálculo da eficiência de retenção dos metais Cádmio e Níquel na matriz cimentícia. Todos os tratamentos foram aprovados nos ensaios de Resistência à compressão, Capacidade de Absorção de Água e Umidificação/Secagem. A partir dos ensaios de lixiviação após a E/S observou-se que o resíduo permaneceu na Classe I (Perigosos), apesar da significativa redução nas concentrações dos metais avaliados. Diante disto, o material deve ser encaminhado para a disposição em aterros específicos para Resíduos Perigosos, conforme recomendação da ABNT NBR 10.157 (1987). A análise estatística dos dados mostrou que a porcentagem de RSL, influenciou significativamente nos ensaios de RC, CAA, U/S e Lixiviação. Todos os tratamentos realizados apresentaram eficiência de retenção superiores a 98%, indicando que a E/S foi um método eficaz no tratamento de resíduos sólidos de laboratório. Através do balanço de massa pode-se observar que houve redução significativa na lixiviação do Cádmio e do Níquel após a E/S, comparando-se com o resíduo sólido de laboratório bruto, sem tratamento. Com isto concluiu-se que apesar do RSL permanecer na Classe I (Perigosos) houve redução expressiva nas massas de Cádmio e Níquel, constatando que a E/S foi um processo eficiente na atenuação dos contaminantes presentes.

Palavras-chave: Resíduos sólidos; lixiviação; balanço de massa; eficiência.

RODRIGUES JOVELINO, Josevânia. **Tratamento de resíduo sólido de laboratório por Estabilização por Solidificação e balanço de massa dos metais pesados Cádmio e Níquel.** 2018. 91p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2018. Orientador: Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito.

ABSTRACT

Higher Education Institutions represent a problem related to the treatment and final disposal of waste generated in their laboratories. The objective of this research was to perform the Solid of Laboratory Waste (SLW) treatment through the Solidification Stabilization (S/S) process and to apply the mass balance to the Cadmium and Nickel metals, in order to determine if there was attenuation of contaminants presents. The first stage of the research consisted in the characterization and classification of SLW, cement, sand and gravel. Afterwards, a one-way experimental planning was performed using the percentage of SLW as a factor and the response variables were: Compression Resistance (CR), Water Absorption Capacity (WAC), Humidification / Drying (H/D) and Lixiviation. Then the samples were prepared for 10%, 30% and 45% of SLW, where the integrity, durability and immobilization of contaminants tests were carried out. Finally, the statistical analysis of the data, the mass balance and the calculation of the retention efficiency of the metals Cadmium and Nickel in the cementitious matrix were carried out. All treatments were approved in the tests of Compressive Strength, Water Absorption Capacity and Humidification / Drying. From the leaching tests after the S/S it was observed that the residue remained in Class I (Hazardous), despite the significant reduction in the concentrations of the evaluated metals. In view of this, the material should be sent to the disposal in specific landfills for Hazardous Waste, according to the recommendation of ABNT NBR 10.157 (1987). Statistical analysis of the data showed that the percentage of SLW influenced significantly of the CR, WAC, H/D and Lixiviation tests. All treatments performed had a retention efficiency above 98%, indicating that S/S was an effective method for the treatment of laboratory solid waste. Through the mass balance it can be observed that there was significant reduction in the leaching of Cadmium and Nickel after the S/S, when compared to the crude of laboratory solid residue, without treatment. With this, it was concluded that, although SLW remained in Class I (Hazardous), there was significant reduction in the Cadmium and Nickel masses, noting that S/S was an efficient process to attenuate the contaminants present.

Keywords: solid waste; lixiviation; mass balance; efficiency.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Diagrama esquemático de algumas definições utilizadas..... | 20 |
| Figura 2: Etapas da preparação dos corpos de prova. | 47 |
| Figura 3: Dinamômetro utilizado para o ensaio de RC..... | 48 |
| Figura 4: Ensaio de Capacidade de Absorção de Água. | 50 |
| Figura 5: Ensaio de Umidificação/Secagem. | 51 |
| Figura 6: Equipamento rotativo de frascos para o ensaio de lixiviação..... | 52 |
| Figura 7: Ensaio de Solubilização..... | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Limites máximos permissíveis para lixiviação e solubilização de alguns contaminantes. | 23 |
| Tabela 2: Planejamento do Experimento..... | 42 |
| Tabela 3: Análise de variância (ANOVA). | 43 |
| Tabela 4: Aspectos Operacionais. | 45 |
| Tabela 5: Utilização do material E/S..... | 49 |
| Tabela 6: Caracterização do cimento CIMPOR - CP II- Z 32, da areia, do RSL e da brita..... | 55 |
| Tabela 7: Caracterização físico-química do cimento Portland..... | 56 |
| Tabela 8: Teor de metais pesados: Extrato lixiviado do RSL, do Cimento Portland, da areia e da brita..... | 57 |
| Tabela 9: Resultados do Ensaio de RC para os corpos de prova preparados. | 58 |
| Tabela 10: Avaliação estatística dos dados para os ensaios de RC..... | 60 |
| Tabela 11: Ensaio de CAA para os corpos de prova preparados. | 61 |
| Tabela 12: Avaliação estatística dos dados para a CAA. | 63 |
| Tabela 13: Resultados do Ensaio de U/S para os corpos de prova preparados. | 64 |
| Tabela 14: Avaliação estatística dos dados para a U/S. | 65 |
| Tabela 15: Valores dos LMP para o cádmio e o níquel. | 66 |
| Tabela 16: Quantificação dos metais cádmio e níquel presentes no extrato lixiviado.. | 67 |
| Tabela 17: Avaliação estatística para a lixiviação do cádmio..... | 68 |
| Tabela 18: Avaliação estatística para a lixiviação do níquel..... | 69 |
| Tabela 19: Balanço de massa e eficiência do processo de E/S no extrato lixiviado do Cádmio. | 70 |
| Tabela 20: Balanço de massa e eficiência do processo de E/S no extrato lixiviado do Níquel. | 71 |
| Tabela 21: Classificação dos Materiais E/S. | 73 |

LISTA DE FLUXOGRAMAS

| | |
|---|----|
| Fluxograma 1: Fluxograma com as etapas realizadas na pesquisa..... | 40 |
| Fluxograma 2: Rotas para a destinação do material E/S com 10%, 30% e 45% de RSL. | 75 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|----------------|--|
| ABCP | Associação Brasileira de Cimento Portland |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANOVA | Análise de Variância |
| BOP | Borra Oleosa de Petróleo |
| CAA | Capacidade de Absorção de Água |
| CCT | Centro de Ciências e Tecnologia |
| CETESB | Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| Cd | Cádmio |
| Cr | Cromo |
| Cu | Cobre |
| CPCA | Campo Petrolífero Canto do Amaro |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio |
| E/S | Estabilização por Solidificação |
| ETE | Estação de Tratamento de Efluentes |
| Fe | Ferro |
| GL | Graus de Liberdade |
| IARC | International Agency for Research on Cancer |
| LABGER | Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos |
| Ni | Níquel |
| Pb | Chumbo |
| PEBD | Polietileno de Baixa Densidade |
| PPGEQ | Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química |
| PROGERE | Programa de Gerenciamento de Resíduos da UFC |
| RC | Resistência à Compressão |
| RSL | Resíduo Sólido de Laboratório |
| RSS | Resíduo Sólido Sintético |
| ST | Sólidos Totais |
| STF | Sólidos Totais Fixos |
| STV | Sólidos Totais Voláteis |
| UAEQ | Unidade Acadêmica de Engenharia Química |
| U/S | Umidificação/Secagem |
| UFC | Universidade Federal do Ceará |
| UFCG | Universidade Federal de Campina Grande |
| WTC | Wasterwater Technology Center |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| RESUMO | 8 |
| ABSTRACT | 9 |
| LISTA DE FIGURAS..... | 10 |
| LISTA DE TABELAS..... | 11 |
| LISTA DE FLUXOGRAMAS..... | 12 |
| LISTA DE SIGLAS..... | 13 |
| SUMÁRIO..... | 14 |
| 1. INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1. Problemática da pesquisa..... | 17 |
| 1.2. Justificativa da Pesquisa..... | 18 |
| 1.3. Objetivos..... | 19 |
| <i>1.3.1 Geral.....</i> | <i>19</i> |
| <i>1.3.2 Específicos.....</i> | <i>19</i> |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 20 |
| 2.1. Resíduos Sólidos..... | 20 |
| <i>2.1.1 Resíduos da CLASSE I - Perigosos</i> | <i>22</i> |
| <i>2.1.2 Resíduos da CLASSE II A - Não Inertes</i> | <i>22</i> |
| <i>2.1.3 Resíduos da CLASSE II B - Inertes</i> | <i>22</i> |
| 2.2. Resíduos Sólidos de Laboratório (RSL)..... | 24 |
| 2.3. Meio Ambiente: Contaminação por metais pesados..... | 26 |
| <i>2.3.1 Metal Pesado: Cádmio (Cd)</i> | <i>28</i> |
| <i>2.3.2. Metal Pesado Níquel (Ni).....</i> | <i>29</i> |
| 2.4. Estabilização por solidificação de metais pesados..... | 31 |
| 2.5. Balanço de massa do processo de Estabilização por Solidificação..... | 34 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 38 |
| 3.1 Infraestrutura..... | 38 |
| 3.2 Materiais..... | 38 |
| <i>3.2.1 Drogarias e Reagentes</i> | <i>38</i> |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.2 Equipamentos e vidrarias..... | 38 |
| 3.2.3 Aglomerantes e resíduos | 38 |
| 3.3 MÉTODOS..... | 39 |
| 3.3.1 Planejamento experimental e análise estatística dos dados | 41 |
| 3.3.2 Caracterização e classificação do RSL, cimento, areia e brita | 44 |
| 3.3.3 Confeção dos corpos de prova | 45 |
| 3.3.4 Integridade e durabilidade do material E/S..... | 47 |
| 3.3.4.1 Resistência à Compressão | 47 |
| 3.3.4.2 Capacidade de Absorção de Água..... | 49 |
| 3.3.4.3 Umidificação e Secagem | 50 |
| 3.3.5 Análise ambiental e imobilização dos contaminantes..... | 51 |
| 3.3.5.1 Lixiviação..... | 51 |
| 3.3.5.2 Solubilização | 52 |
| 3.3.6. Eficiência de retenção dos contaminantes | 53 |
| 3.3.7. Balanço de massa do processo de E/S | 53 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 55 |
| 4.1. Caracterização do cimento Portland, RSL, areia e brita..... | 55 |
| 4.2. Classificação do cimento Portland, areia, brita e RSL..... | 57 |
| 4.3 Avaliação da Integridade e Durabilidade dos Materiais E/S | 58 |
| 4.3.1 Resistência à Compressão..... | 58 |
| 4.3.2 Capacidade de Absorção de Água (CAA)..... | 61 |
| 4.3.3 Umidificação e Secagem | 64 |
| 4.4 Imobilização dos Contaminantes..... | 66 |
| 4.4.1 Análise da Lixiviação | 66 |
| 4.5 Balanço de Massa e Eficiência do processo de E/S..... | 70 |
| 4.6 Rotas de Destinação do RSL..... | 72 |
| 5. CONCLUSÕES | 76 |
| SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 77 |
| REFERÊNCIAS | 78 |
| ANEXO A..... | 88 |
| ANEXO B..... | 89 |

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o grande desafio das comunidades científicas tem sido promover o desenvolvimento das nações visando não apenas o setor econômico, mas levando em consideração também o setor social. Neste contexto, diversas conferências internacionais vêm sendo realizadas com o objetivo de promover políticas públicas que estimulem o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos.

A construção civil aparece como uma área promissora, que vem se destacando pela reutilização de resíduos sólidos na produção de blocos, tijolos cerâmicos e tijolos cimentícios, entre outros. Observa-se que antes da reutilização e/ou utilização de resíduos sólidos perigosos deve-se ter o controle da quantidade de contaminantes presentes no resíduo sólido perigoso antes do tratamento (bruto) e após o tratamento (GUIMARÃES, 2014).

A Estabilização por Solidificação (E/S) surge como uma alternativa viável para o tratamento e disposição destes resíduos. É um procedimento que tem a capacidade de converter resíduos tóxicos para uma forma física e quimicamente mais estáveis, ou seja, modifica quimicamente resíduos perigosos a fim de se obter uma forma menos tóxica destes. Este processo permite interações químicas entre os resíduos e o agente de ligação (CHEN *et al.*, 2008).

Sabe-se que toda entrada de matéria deve encontrar uma saída quantificada no produto, subprodutos e nos rejeitos sólidos, líquidos e gasosos. Neste contexto torna-se importante realizar o balanço de massa do processo cujo objetivo é quantificar as massas de resíduo sólido de laboratório antes e após passar pelo processo de Estabilização por Solidificação. Vale salientar que o balanço de massa deve ser complementado com outras informações sobre os produtos utilizados, tais como: propriedades físico-químicas, toxicidade, perigo e potencial de evolução.

O presente trabalho faz parte de uma série de pesquisas que vem sendo desenvolvidas no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos (LABGER), pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Química, localizado no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAEQ/CCT/UFCG).

1.1. Problemática da pesquisa

A Estabilização por Solidificação destaca-se entre os tratamentos físico-químicos, por propiciar a retenção dos contaminantes presentes no resíduo sólido, tornando-os mais estáveis quimicamente, de modo a reduzir o impacto ambiental bem como melhorar a qualidade de vida da população.

Visando verificar a retenção de metais pesados na E/S aplica-se o balanço de massa ao processo. De maneira geral, um balanço de massa consiste em uma descrição dos fluxos de massa para dentro e para fora do sistema, descrevendo as vazões e concentrações de cada corrente e eventualmente também do interior do sistema.

Segundo Aquim (2009), o emprego do balanço de massa leva em consideração o princípio da conservação da massa: “a massa de um sistema fechado permanece constante durante os processos que nele ocorrem”. Considera-se que a massa alimentada durante o intervalo de tempo a um sistema aberto é igual a massa que sai, mais a massa que ficou acumulada no sistema durante o intervalo de tempo considerado.

Oliveira (2012) realizou o balanço de massa do processo de E/S para determinar a eficiência de transformação em cada tratamento em termos de aplicação, transformação e acumulação da massa do resíduo sólido sintético. Concluiu que através do balanço de massa foi possível comprovar que a Estabilização por Solidificação foi adequada para tratar o resíduo perigoso numa matriz de cimento sob diferentes condições de cura e percentagem do contaminante, além de verificar a retenção dos contaminantes.

Dias (2015) aplicou o balanço de massa ao processo de E/S com o objetivo de otimizar o processo e indicar os limites de avaliação ambiental de materiais estabilizados por solidificação após a incorporação de borra oleosa de petróleo. Concluiu que através da realização do balanço de massa ao processo de E/S foi possível encontrar a eficiência de retenção dos contaminantes (superior a 70%), indicando que a Estabilização por Solidificação é viável e apresenta bons resultados para tratar resíduos oleosos.

1.2. Justificativa da Pesquisa

De acordo com Brito e Soares (2009), o processo de Estabilização por Solidificação possui vantagens no ponto de vista técnico e econômico. Tecnicamente podem ser destacados como vantagem da E/S a disponibilidade e a ocorrência de minerais como matérias-primas para preparação das misturas, além da redução do custo com materiais e equipamentos para realização do processo.

Do ponto de vista econômico, a E/S é considerada vantajosa quando comparada a outras tecnologias disponíveis, pois possibilita que o produto final tenha uma destinação adequada podendo em muitos casos, ser comercializado, reduzindo os custos com o processo (BRITO e SOARES, 2009).

Nesse contexto, torna-se fundamental realizar o balanço de massa dos contaminantes presentes nos resíduos sólidos, pois somente através dele é possível otimizar a relação entre os materiais envolvidos no processo.

Bandeira *et al.* (2012) concluiu que o balanço de massa é indispensável para obter informações sobre a quantidade de contaminante e aglomerante a ser utilizado para estabilizar e solidificar resíduos perigosos, pois, a E/S não se apresenta como um procedimento padronizado e necessita de modificações na quantidade de aglomerantes para imobilizar determinados materiais perigosos.

Guimarães (2017) destaca a importância de se realizar o balanço de massa dos contaminantes do processo de E/S, pois avalia a retenção do contaminante em função das massas e concentrações dos tratamentos, tornando-se um indicativo de que houve tratamento e não a diluição do resíduo sólido na massa aglomerante.

Justifica-se essa pesquisa pela elevada quantidade de resíduos sólidos gerados em laboratórios dos departamentos de química das Instituições de Ensino Superior, pois a Estabilização por Solidificação é capaz de melhorar as características físicas e de manuseio dos resíduos, diminuir a área superficial para evitar que ocorra a transferência ou perda de poluentes, além de limitar a solubilidade de qualquer componente do resíduo e desintoxicá-lo.

A relevância desse trabalho dar-se-á, também, pela aplicação do balanço de massa ao processo de E/S, pois somente por meio dele é possível encontrar as melhores proporções entre resíduo e aglomerante, de modo a se obter uma melhor eficiência do processo.

1.3. Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar o tratamento de Resíduos Sólidos de Laboratório a partir do processo de E/S e efetuar o balanço de massa dos metais pesados Níquel e Cádmio presentes em resíduos sólidos coletados nos laboratórios de Química Geral e Química Analítica, pertencentes à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

1.3.2 Específicos

- Determinar a toxicidade dos materiais através da caracterização e classificação do Resíduo Sólido de Laboratório, do cimento, da areia e da brita;
- Realizar os ensaios de Resistência à Compressão, Capacidade de Absorção de Água, Umidificação e Secagem para avaliar a integridade e durabilidade do material E/S;
- Analisar a imobilização do Cádmio e do Níquel por meio dos ensaios de lixiviação e solubilização;
- Determinar a eficiência de retenção de metais pesados Cádmio e Níquel presentes no RSL;
- Realizar o balanço de massa do processo de Estabilização por Solidificação.

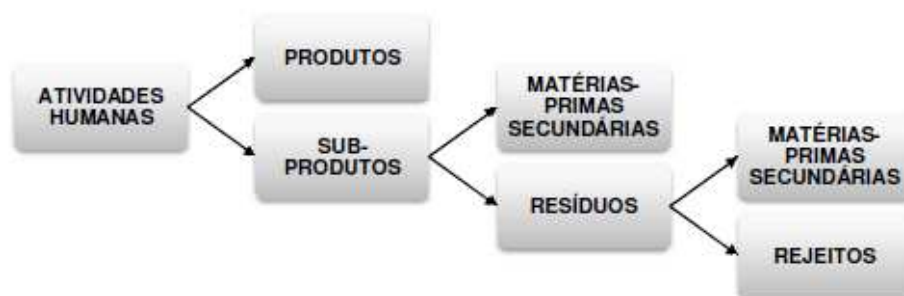
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos têm sua denominação derivada do latim: “*residuu*”, que representa o que resta de determinada substância, onde acompanhado pela expressão “sólido” diferencia-se de líquidos e gases (NAIME *et al.*, 2004).

De acordo com Philippi (2005), nos processos industriais são gerados produtos, subprodutos, resíduos e rejeitos, conforme a Figura 1.

Figura 1: Diagrama esquemático de algumas definições utilizadas.



Fonte: (PHILIPPI, Jr., 2005).

O setor industrial brasileiro vem passando nos últimos anos por uma intensa fase de transformação. Essas mudanças estão diretamente relacionadas com as tendências atuais de crescente urbanização, aceleração na comunicação e reestruturação das empresas cada vez mais preocupadas em maximizar a competitividade comercial (FERREIRA *et al.*, 2010).

Segundo Souza *et al.* (2017) a gestão de resíduos sólidos é um dos assuntos ambientais em evidência atualmente, tendo em vista que a sua geração expressiva associada aos impactos ambientais negativos decorrentes do gerenciamento inadequado são fatores preocupantes que motivam essa discussão.

Nos últimos anos tem crescido o número de pesquisas visando desenvolver métodos eficientes com a finalidade de incorporar resíduos sólidos, em novos produtos. O setor de construção civil tem se destacado principalmente devido à grande demanda de matéria prima e a exploração de recursos naturais não renováveis relacionados (BROCKER *et al.*, 2018).

De acordo com Tinoco e Kraemer (2011), os resíduos industriais apresentam-se como um dos maiores responsáveis pelas agressões fatais ao meio ambiente. Neles estão presentes produtos químicos (cianureto, pesticidas, solventes), metais (mercúrio, cádmio, chumbo) e solventes químicos que são um risco para os ciclos naturais onde são lançados.

Conforme Silva (2015) pode-se definir resíduos perigosos como sendo aqueles que podem causar danos nocivos à saúde dos seres humanos, de outros organismos e ao meio ambiente devido às suas propriedades físicas, químicas e infectocontagiosas.

Certos resíduos perigosos são jogados no meio ambiente, precisamente por serem tão danosos. Muitos metais e produtos químicos não são naturais, nem biodegradáveis. Em consequência, quanto mais se enterram os resíduos, mais os ciclos naturais são ameaçados, e o ambiente se torna poluído. Desde os anos 50, os resíduos químicos e tóxicos têm causado desastres cada vez mais frequentes e sérios (TINOCO e KRAEMER, 2011).

Segundo de Mello e Sehnem (2015), a adequada destinação dos resíduos sólidos constitui um dos grandes desafios da humanidade. Sendo no caso do Brasil o desafio ainda maior, tendo em vista que poucos são os casos de destinação final correta dos resíduos sólidos industriais.

A ABNT NBR 10.004 (2004) define Resíduos Sólidos como:

“Resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exigem para isso soluções térmicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT NBR 10.004/2004).”

Pela norma citada acima, a classificação dos resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou a atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e suas características, bem como quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente. Segundo a ABNT NBR 10.004 (2004), os resíduos sólidos são divididos em dois grupos: perigosos e não perigosos.

2.1.1 Resíduos da CLASSE I - Perigosos

Aqueles que apresentam riscos à saúde pública provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices, além de representar riscos ao meio ambiente quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

Os resíduos classificados como perigosos possuem algumas propriedades intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

2.1.2 Resíduos da CLASSE II A - Não Inertes

Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos da classe I – Perigosos ou Classe II B – Inertes. Os resíduos desta classe podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

São considerados “não inertes” quando em sua constituição apresentam substâncias que se solubilizam atingindo níveis acima do valor máximo admitidos como seguros para o meio ambiente de acordo com a norma ABNT NBR 10.004/2004.

2.1.3 Resíduos da CLASSE II B - Inertes

Quaisquer resíduos que não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto cor, turbidez, dureza e sabor.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros e limites máximos permissíveis no extrato lixiviado e solubilizado conforme a recomendação da ABNT NBR 10005/2004, ABNT NBR 10006/2004 e os valores sugeridos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) – Portaria nº 195 de 2005 (CETESB, 2005).

Tabela 1: Limites máximos permissíveis para lixiviação e solubilização de alguns contaminantes.

| Parâmetro | Lixiviação | | Solubilização | |
|---------------------------|-------------|-------------|---------------|-------------|
| | (mg/L) | (mg/Kg) | (mg/L) | (mg/Kg) |
| Arsênio ¹ | 1,0 | 20,0 | 0,01 | 0,04 |
| Cádmio¹ | 0,5 | 10,0 | 0,005 | 0,03 |
| Chumbo ¹ | 1,0 | 20,0 | 0,01 | 0,02 |
| Cobre ² | 2,0 | 40,0 | 2,0 | 8,0 |
| Cromo total ¹ | 5,0 | 100,0 | 0,05 | 0,2 |
| Mercúrio ¹ | 0,1 | 2,0 | 0,001 | 0,004 |
| Níquel² | 0,02 | 0,4 | 0,02 | 0,08 |
| Zinco ² | 5,0 | 100,0 | 5,0 | 20,0 |

Nota: ¹ Parâmetros e limites máximos no extrato lixiviado e solubilizado conforme recomendação da ABNT NBR 10005/2004b, ABNT NBR 10006/2004c e ABNT NBR 10007/2004d; ² Valores sugeridos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) – Portaria nº 195 de 2005 (CETESB, 2005).

Os resíduos das classes I e II devem ser tratados antes mesmo da destinação apropriada. Por exemplo, os aterros industriais precisam de mantas impermeáveis e diversas camadas protetoras para evitar a contaminação do solo e das águas, além de instalações preparadas para receber o lixo industrial e hospitalar, normalmente operados por empresas privadas, seguindo o conceito do poluidor-pagador (KRAEMER, 2005).

Segundo Bandeira *et al.* (2012), resíduos perigosos chamam atenção para as indústrias químicas e petroquímicas, em virtude da potencialidade tóxica associada aos resíduos gerados. A manipulação e destinação correta de um resíduo tem grande importância para o controle do risco que ele representa, pois, um resíduo relativamente inofensivo, em mãos inexperientes, pode transformar-se em um risco ambiental bem mais grave.

Na presente pesquisa serão estudados os metais pesados Níquel, que possui limite máximo permissível de 0,02mg/L tanto para lixiviação quanto para a solubilização, e o Cádmio que possui limite máximo permissível de 0,5mg/L para a lixiviação e 0,005mg/L para a solubilização.

2.2. Resíduos Sólidos de Laboratório (RSL)

Pequenos geradores de resíduos, tais como instituições de ensino e de pesquisa, laboratórios de análises bioquímicas e físico-químicas, normalmente são considerados pelos órgãos fiscalizadores como atividades não impactantes, sendo assim raramente fiscalizados quanto ao descarte de seus rejeitos químicos (JARDIM, 1998).

As indústrias constituem um dos maiores produtores de resíduos químicos, no entanto a geração deste tipo de rejeito não se restringe somente a elas. Sendo os laboratórios de universidades, escolas e institutos de pesquisa também geradores de resíduos de elevada diversidade e com reduzido volume (LIMA *et al.*, 2016).

Para Imbroise *et al.* (2006) um aspecto primordial a ser considerado é o fato de boa parte dos laboratórios lançarem seus resíduos na pia, não podendo garantir, desta forma, que existe um monitoramento real do volume de resíduo químico gerado pelo laboratório.

Existem outros elementos que contribuem para agravar o problema da gestão de resíduos químicos, tais como: a ausência de um órgão gestor, a falta de consciência e visão de professores e pesquisadores, o descarte inadequado que reflete o descaso com o meio ambiente e a falta de estrutura e fiscalização de órgãos governamentais (SASSIOTTO, 2005).

Os Institutos e Departamentos de Química das Universidades têm sido confrontados, ao longo dos anos, com o problema relacionado ao tratamento e a disposição final dos resíduos gerados em seus laboratórios de ensino e pesquisa (GERBASE *et al.*, 2005).

Segundo Schneider (2014) são considerados resíduos químicos os oriundos de laboratórios de instituições de ensino, pesquisa, produção e extensão. Dentre estes resíduos podem-se encontrar produtos hormonais, citostáticos, desinfetantes além de reagentes químicos contendo metais pesados.

Vaz *et al.* (2014) afirma que as instituições de ensino e pesquisa devem ultrapassar o limite de preocupação de somente ensinar e formar profissionais e ocupar um papel maior no contexto da sociedade, capacitando pessoas conscientes da necessidade de garantir a sustentabilidade ambiental às futuras gerações.

Conforme Souza *et al.* (2018) é necessário promover um levantamento sobre os principais problemas enfrentados nos laboratórios químicos de instituições de ensino superior, visando propor soluções capazes de minimizar e/ou evitar a ocorrência de

acidentes, os quais podem vir a resultar em transtornos maiores para professores, alunos e para a própria instituição.

Para Reichert e Teixeira (2009) a realização do gerenciamento de resíduos sólidos deve ser conduzida através de um plano de gerenciamento de resíduos. Este deve abranger as questões pertencentes à geração, segregação, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e disposição final.

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).

De acordo com Polastri *et al.* (2018) para escolher a melhor técnica para o tratamento de resíduos sólidos deve-se avaliar alguns aspectos importantes, tais como: qual tratamento é mais eficiente para cada tipo de resíduo; os custos envolvendo a coleta, transporte e tratamento/disposição; o atendimento aos requisitos legais; bem como as vantagens e desvantagens da técnica escolhida.

Silva *et al.* (2015) avaliou o Programa de Gerenciamento de Resíduos da Universidade Federal do Ceará (PROGERE – CE) com o objetivo de promover a gestão correta dos diversos tipos de resíduos gerados na instituição, além de incentivar a conscientização da comunidade acadêmica com relação à questão ambiental. Concluíram que através do gerenciamento de resíduos é possível a reutilização de reagentes caracterizados como resíduos passivos, acumulados ao longo dos anos nos diversos laboratórios da UFC, reduzindo os custos na compra de novos reagentes e, por conseguinte minimizar o risco de acidentes ambientais.

Moreira *et al.* (2016) realizou a estimativa e a caracterização, quantitativa e qualitativa, dos resíduos químicos ativos do laboratório de Solos da Universidade Estadual do Tocantins a partir do grau de riscos e periculosidade dos mesmos. Concluíram que a caracterização desses resíduos se torna indispensável para fornecer ao gerenciador, o conhecimento necessário para que o mesmo possa definir quais as medidas a serem adotadas para um correto tratamento e disposição dos resíduos.

Lozovey (2014) defende que um projeto de gerenciamento de resíduos colabora para minimizar riscos, ou eliminar a insalubridade e periculosidade de vários locais, e para motivar os discentes, técnicos e docentes para a percepção de que são competentes de gerar conhecimento e descartar corretamente o que possa causar risco grave à saúde ou ao ambiente.

Os resíduos sólidos de laboratórios apresentam um elevado potencial de contaminação, pois, possuem em sua constituição componentes químicos e biológicos nocivos ao meio ambiente e à saúde dos seres vivos, tornando o seu tratamento altamente necessário. Uma maneira de tratar este tipo de resíduo é através do encapsulamento do contaminante em uma matriz sólida cimentícia (NASCIMENTO *et al.*, 2018).

2.3. Meio Ambiente: Contaminação por metais pesados

Os primeiros agentes tóxicos conhecidos pelo Homem foram os metais pesados, descobertos por volta de 2000 a.C. Sabe-se que, dos metais conhecidos nem todos possuem efeito tóxico (KLAASSEN, 1996). Estima-se que apenas 37,5% dos metais descobertos provocam toxicidade para o homem, ou seja, dos 80 metais conhecidos apenas 30 apresentam características tóxicas (VRIES, 2000).

O gradativo aumento da industrialização e expansão urbana vem potencializando a introdução de quantidades indesejáveis de poluentes no ambiente, incluindo os metais pesados (MORAES e JORDÃO, 2002).

De acordo com Baccan *et al.* (2001), metal pode ser definido como o elemento químico que possui fortes ligações químicas entre seus átomos, além de apresentarem três características fisicamente definidas: conduzir eletricidade, ter brilho, ser maleável e flexível.

Quimicamente podem-se definir os metais pesados como um grupo de elementos que se situam na tabela periódica entre o Cobre (Cu) e o Chumbo (Pb), que possuem peso específico maior que 5g/cm^3 ou número atômico superior a 20. Estes metais são quimicamente muito reativos e bioacumulativos, ou seja, o organismo não é capaz de eliminá-los de uma forma rápida e eficaz (COLACIOPPO, 2001).

De acordo com Franco *et al.* (2015), a contaminação por metais pesados vem se tornando um problema ambiental sério. Ela se origina principalmente das indústrias e das Instituições de Ensino e Pesquisa, estas em menor proporção. Determinados metais pesados são substâncias que apresentam alto potencial tóxico e não são compatíveis com a maioria dos tratamentos biológicos de efluentes existentes.

Em contrapartida, nem todos os metais provocam danos para a saúde humana e animal. Diversos metais pesados, quando presentes em quantidades mínimas, desempenham importante papel para os organismos vivos, inclusive para os seres humanos (SILVA, 2015).

Segundo Tsutiya (1998), os principais elementos químicos classificados como metais pesados são: alumínio, antimônio, arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cobalto, cromo, ferro, manganês, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio e zinco.

Ainda de acordo com Tsutiya (1998) algumas maneiras de se controlar a disponibilidade e solubilidade destes metais pesados no solo podem ser realizadas por meio de reações de adsorção, complexação, solubilização, oxirredução e precipitação. O lançamento de efluentes industriais provenientes das indústrias químicas, indústrias de tintas, de petróleo, de couro e similares, contribui para o surgimento de metais pesados, que por sua vez irão prejudicar os lençóis freáticos e provocar danos ao meio ambiente.

Segundo Rocha e Azevedo (2015), alguns metais pesados são considerados essenciais do ponto de vista biológico, porém quando presentes em altos teores causam impactos negativos à saúde dos seres vivos, constituindo um problema ambiental ou de saúde pública.

O meio mais usual de contaminação por metais pesados é através da descarga de efluentes não tratados em rios ou lagos. Assim, torna-se necessário o estabelecimento de normas para o lançamento de efluentes. Nesta perspectiva, os valores máximos permitidos de metais pesados que possam estar em um determinado efluente foram estabelecidos, em 1986, pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 1986).

Os metais pesados chegam ao homem por meio da água, do ar e do sedimento, tendendo a se acumular no meio aquático. Alguns destes metais podem se acumular ao longo da cadeia alimentar, onde os predadores apresentam as maiores concentrações (CASTRO, 2006).

A manifestação dos efeitos tóxicos está associada à dose e pode distribuir-se por todo o organismo, afetando vários órgãos, alterando os processos bioquímicos, organelas e membranas celulares (YOKEL, 2006).

Aguiar (2002) avaliou a remoção de metais pesados de efluentes industriais por meio de Aluminossilicatos, concluindo a potencialidade deste material tanto em processos contínuos quanto em batelada podendo, desta forma, ser empregado em diversos tipos de rejeitos.

Castro (2006) investigou os efeitos causados pelo lançamento de metais no Rio das Velhas - MG. Através da realização de análises físico-químicas, bacteriológicas e de zoobentos concluiu que os impactos ocasionados pelo lançamento de metais pesados em meios aquáticos apontam para a redução da biodiversidade de zoobentos, o que demanda

ações do poder público e da sociedade, no sentido de reduzir os teores de contaminantes tóxicos lançados, visando à recuperação do ecossistema.

Rocha (2009) estudou a problemática dos metais pesados na saúde pública. Através de sua pesquisa concluiu que o cádmio, o chumbo e o mercúrio são três dos principais metais que podem afetar o homem, conduzindo a um quadro com diversos sintomas inerentes a inúmeras patologias, que irão refletir na saúde pública.

Pinto Filho (2016) avaliou os teores de metais pesados (Cádmio, Cobre, Cromo, Chumbo, Ferro, Manganês, Níquel e Zinco) em diferentes ambientes do Campo Petrolífero Canto do Amaro, no Rio Grande do Norte (CPCA/RN). Concluíram que os ambientes relacionados diretamente com a indústria de petróleo foram os que apresentaram maiores níveis médios dos metais pesados Cu, Cr, Fe e Ni.

Moraes *et al.* (2016) realizou o estudo dos metais pesados e seus impactos ambientais, em efluentes, afluentes e na destinação final inadequada dos resíduos gerados pelas indústrias. Concluiu que o mercúrio (Hg), o cádmio (Cd), o chumbo (Pb), o arsênio (As), o cromo (Cr) e o manganês (Mn) são os seis metais pesados encontrados frequentemente em resíduos industriais e que estão associados diretamente a desastres ambientais ou doenças.

2.3.1 Metal Pesado: Cádmio (Cd)

O cádmio é um metal pesado que foi descoberto em 1817, passando rapidamente a ser um metal importantíssimo ao nível industrial, principalmente na produção de baterias, tintas e plásticos (KLAASSEN, 2001). Trata-se de um elemento químico de número atômico 48 (48 prótons e 48 elétrons) e de massa atômica igual a 112,4 u. À temperatura ambiente, o cádmio encontra-se no estado sólido.

O cádmio é um metal pesado que pode ser adicionado ao solo através de resíduos de pneus, óleos, disposição de lixo urbano, lodo de esgoto e fertilizantes fosfatados, é facilmente absorvido e translocado nas plantas, além de ter a capacidade de entrar na cadeia alimentar humana, ocasionando sérios problemas para a saúde (DIAS *et al.*, 2001).

O metal pesado cádmio é comumente encontrado na natureza associado ao zinco, cobre e chumbo. O cádmio pode se dissolver em soluções ácidas e em nitrato de amônio, sendo insolúvel em água. Ao ser aquecido ou queimado dá origem ao óxido de cádmio que também é insolúvel em água, sendo reconhecido como um pó branco ou em forma de cristais vermelhos (RAMIREZ, 2002).

A presença de cádmio nos solos é oriunda da precipitação e deposição do cádmio presente na atmosfera. Além disso, existem outras formas de contaminação do solo, que pode ocorrer através dos resíduos gerados na fabricação de cimento, da queima de combustíveis fósseis e lixo urbano e de sedimentos de esgotos (GUISARD, 2006).

O cádmio entra no organismo através das vias inalatória e digestiva. A entrada pela via inalatória acontece principalmente em ambiente industrial e através do uso de cigarros. A exposição ao cádmio também pode ocorrer por via digestiva através dos alimentos, destacando-se sua presença principalmente em ostras, mariscos e plantas (REEVES, 2008).

Em doses baixas, o primeiro órgão a acumular cádmio são os rins, em doses mais elevadas o cádmio livre pode comprometer o fígado, pâncreas, tireoide, coração, pulmões, sistema esquelético, entre outros. O cádmio é excretado do organismo lentamente, ocorrendo principalmente por meio da via urinária e intestinal. Por via urinária a excreção de cádmio progride com o aumento da idade. Existem também outras vias de excreção como a salivar ou a sudorese, que são menos frequentes (PINHEIRO *et al.*, 2017).

O acúmulo de cádmio também pode vir a comprometer o sistema nervoso, afetando o sistema visual, olfato, além de alterações na memória. Ao entrar em contato com doses elevadas de cádmio o ser humano pode apresentar sintomas como vômitos, diarreia, dor nos rins, ossos frágeis, podendo o quadro ao se agravar conduzir o sujeito até a morte.

A maneira mais simples para se determinar uma intoxicação por cádmio é através de exames de sangue e de urina. Não existe qualquer terapia aprovada ao nível clínico para fazer face a intoxicações por cádmio. O tratamento visa apenas, reduzir e aliviar os sintomas da intoxicação (MARTINS, 2016).

2.3.2. Metal Pesado Níquel (Ni)

O níquel (Ni) é caracterizado como metal pesado, possuindo densidade de 8,5g/cm³ e é atualmente o 24º metal em maior quantidade na crosta terrestre. É um metal que apresenta grande resistência à corrosão e oxidação pelo ar, água e agentes alcalinos (GONZALEZ, 2016).

O níquel é um elemento natural da superfície terrestre e não é vital para as funções humanas. É um metal estável e persistente no ambiente, visto que não pode ser biologicamente ou quimicamente degradado ou destruído. Pode ser utilizado na produção

de ligas de aço, galvanoplastia, baterias de níquel-cádmio, ferramentas, componentes eletrônicos, etc. (NORDBERG *et al.*, 2007).

Este metal também pode ser utilizado como catalisador em certas reações de hidrogenação, tais como na fabricação da margarina e manteiga a partir de gorduras líquidas (PEIXE, 2010). Outra situação onde o níquel é bastante utilizado são os processos de eletrodeposição, pois, além de aumentar a resistência à corrosão, também fornece características decorativas devido a sua cor prateada (KRAPF e FERREIRA, 2014).

De acordo com Ventura *et al.* (2016) outras fontes de exposição para a população em geral não fumadora, são os alimentos e a água. Outra forma de exposição ao níquel acontece ao tocar em objetos contendo este metal, como por exemplo: moedas, joias e aço inoxidável.

Os processos industriais são responsáveis pela maior exposição do ser humano a maiores concentrações de níquel e seus compostos do que as normalmente verificadas na natureza (GONZALEZ, 2016).

Segundo Savazzi (2013) os compostos de níquel insolúveis em água são carcinogênicos, entretanto, pesquisas recentes mostraram que compostos solúveis também apresentam o mesmo risco.

Alguns compostos de níquel foram classificados pela International Agency for Research on Cancer como agentes carcinogênicos para a saúde humana (IARC, 2012). Além disso, pode ocorrer dermatite endógena ocasionada pela ingestão de alimentos com níquel, tendo em vista que aproximadamente 10-20% da população é sensível ao metal (CARRAPATOSO *et al.* 2004).

Conforme explica Munoz (2011), a ingestão de grandes quantidades deste metal resulta em um alto teor de toxicidade para os seres vivos. Os efeitos ocasionados pela exposição do níquel correm no sistema respiratório e podem ser benignos (incluindo asma e fibrose) ou câncer respiratório, podendo também ocasionar problemas nos rins, pulmões, fígado e coração.

Ao entrar em contato com o metal pesado níquel os principais sintomas gerados pelo organismo são cianose, dispneia, tosse, tontura, vômito, taquicardia, etc. O diagnóstico é realizado por meio de exames de urina e diagnóstico clínico.

2.4. Estabilização por solidificação de metais pesados

A adequada destinação de resíduos é um dos tópicos prioritários no que diz respeito a sustentabilidade ambiental. Neste contexto uma das práticas que vêm sendo adotada é a incorporação destes resíduos em matrizes sólidas cimentícias (SERAFINI *et al.*, 2018).

A técnica de Estabilização por Solidificação (E/S) é umas das formas de tratamento e disposição dos resíduos industriais. O material utilizado para E/S, além de solidificar o resíduo perigoso por meios químicos, insolubiliza, imobiliza, encapsula, destrói ou interage com os componentes do resíduo utilizado. Diante destas interações, os resultados obtidos são sólidos não perigosos ou menos perigosos que o resíduo de origem (RAMOS *et al.*, 2009).

De acordo com Brito *et al.* (2009) para aplicar a técnica da Estabilização por Solidificação no tratamento de resíduos é necessário ter conhecimento das respostas ambientais e estruturais, em função da destinação adequada do resíduo.

Utilizada a mais de cinco décadas no tratamento de resíduos sólidos que não podem ser reciclados, reduzidos ou reutilizados, a E/S atua reduzindo a mobilidade dos contaminantes por lixiviação, sendo considerada por diversas vezes e em muitos trabalhos governamentais e científicos, como sendo a “melhor tecnologia disponível comprovada” (SHI e SPENCE, 2005).

O processo de E/S consiste na combinação de dois processos correlacionados que ocorrem ao mesmo tempo visando à obtenção de um produto que provoque menor impacto ao meio ambiente quando descartado ou reutilizado.

A solidificação se refere às mudanças nas propriedades físicas de um resíduo como aumento da resistência à compressão, redução de permeabilidade e encapsulamento de constituintes perigosos. É o processo no qual um produto sólido com propriedades físicas melhoradas (especialmente a resistência) é obtido (WILK, 2004). Já a estabilização trata das alterações químicas dos constituintes perigosos de um resíduo, como reduzir a solubilidade, mobilidade ou forma tóxica do material (CONNER e HOEFFNER, 1998).

A imobilização de resíduos no processo de E/S envolve mecanismos físicos, químicos, ou a combinação de ambos. A estabilização física (solidificação ou encapsulação) muda a forma física, porém não necessariamente causa ligação química dos constituintes do resíduo. Por sua vez, a estabilização de origem química muda os estados químicos dos constituintes do resíduo, de modo que se apresentem em formas menos solúveis em água (BRITO, 2007).

Segundo Brito (2007) um material pode ser considerado estabilizado por solidificação quando ocorre uma redução da periculosidade, mobilidade e solubilidade dos seus contaminantes e há uma garantia de sua resistência à compressão e às variações de temperatura, obtendo-se melhoria da sua integridade/durabilidade.

De acordo com Brito (2007), Shi e Spense (2005), dois aspectos são primordiais para a compreensão da E/S. O primeiro diz respeito ao critério de imobilização dos contaminantes. Os contaminantes são aprisionados ou retidos na forma de um precipitado na superfície da matriz e/ou são incorporados em seu interior.

O segundo aspecto está relacionado ao critério de integridade/durabilidade dos materiais, principalmente quando se afirma que a matriz E/S aprisiona ou retém os contaminantes por meio de mecanismos físicos, sem ocorrerem necessariamente reações químicas, mas aprisionamento físico. Conforme Castro (2010), a matriz deve apresentar boa resistência mecânica, estabilidade química e física, e boa resistência a temperaturas elevadas.

No processo de Estabilização por Solidificação normalmente utiliza-se um fixador (aglomerante) como agente solidificante. Os principais aglomerantes utilizados são o cimento Portland, cal, asfalto, polímero, etc. Dentre estes, o mais empregado é o cimento Portland, pois as reações químicas são ativadas somente pela água (reações de hidratação), ocorrendo à temperatura ambiente, e seu endurecimento (pega), que leva à formação de uma microestrutura sólida, ocorre em algumas horas (BREHM *et al.*, 2013).

O cimento Portland é o aglomerante que mais é utilizado na E/S em que através de fenômenos físicos e/ou químicos tem a capacidade de aprisionar, estabilizar e/ou reter o metal pesado na matriz de cimento, reduzindo a solubilidade e mobilidade dos metais (JOCHEN, 2017).

Na E/S com a utilização de cimento, o processo se baseia na hidratação do cimento, onde os produtos hidratados sofrem interações com o metal, alterando-o ou formando novos compostos (dependendo do metal a ser estabilizado). O processo de E/S

tem início quando a água é adicionada e o aluminato tricálcico (C3A) hidrata-se provocando o endurecimento da mistura (BRITO, 2007).

De acordo com Brehm *et al.* (2013), alguns fatores influenciam na capacidade de fixação de uma matriz de cimento Portland, como por exemplo, a quantidade de água empregada, pois esta é um dos determinantes da estrutura de poros dessa matriz, além da quantidade de resíduo a ser adicionado ao cimento/concreto, o tipo de cimento empregado e as condições ambientais ao qual o material se encontra.

Soares *et al.* (2001) investigou o uso de polietileno de baixa densidade (PEBD) como matriz de solidificação para metais pesados (óxidos de cádmio, chumbo e zinco com 99% de pureza P.A). Os corpos de provas foram submetidos a testes de lixiviação para avaliação da capacidade de retenção dos metais. A retenção dos metais pesados para as porcentagens de 10, 30 e 50% em massa foi satisfatória e proporcional à quantidade introduzida na matriz. Concluiu que o polietileno tem uma boa eficiência como material básico para imobilizar metais pesados.

Oliveira *et al.* (2003) aplicou a técnica de Estabilização por Solidificação para resíduos oleosos da indústria petrolífera, utilizando solo argiloso e bentonita. Em seu estudo, concluiu que os hidrocarbonetos detectados na massa de resíduo solidificado fixaram-se bem na matriz argilosa, e os óleos e graxas tiveram percentual de retenção superior a 99%. Foi possível observar visualmente o melhoramento das características físicas do resíduo pela adição tanto do solo argiloso (caulinita) quanto da bentonita comercial (vermiculita). A bentonita, mesmo em pequenas proporções proporcionou um melhoramento das características físicas do resíduo, adsorvendo bem os líquidos livres.

Brito e Soares (2009), avaliou a integridade/durabilidade e a retenção de metais pesados em materiais estabilizados por solidificação. Os ensaios de integridade/durabilidade foram: resistência à compressão, absorção de água e umidificação e secagem. Em seu trabalho, Brito concluiu que a E/S em matrizes de cimento, bentonita e hidróxido de cálcio é considerada vantajosa quando comparada a outras tecnologias disponíveis, sendo que o seu produto final pode, em muitos casos, ser comercializado, diminuindo ainda mais os custos do processo.

Sousa (2009) empregou a E/S para realizar o tratamento de resíduo gerado a partir da remoção de chumbo de um efluente sintético, onde verificou que a eficiência de retenção do metal após a E/S foi bastante significativa, tendo em vista que conseguiu remover até 100% do metal pesado, ou seja, remoção máxima de chumbo.

Andrade *et al.* (2014) realizaram o tratamento da borra oleosa de petróleo e o estudo cinético do processo de Estabilização por Solidificação. Com os resultados obtidos concluíram que a Estabilização por Solidificação, utilizando como aglomerante o cimento Portland, mostrou-se uma técnica viável para o tratamento da borra oleosa de petróleo. Pois, a borra oleosa é convertida de um resíduo perigoso para um resíduo não perigoso e ao aplicar a técnica da E/S observou-se que o contaminante ficou realmente aprisionado dentro da matriz sólida, evitando a sua lixiviação para o meio ambiente e consequentemente a contaminação.

Dyer e Mignone (1983) demonstram algumas das vantagens do processo de E/S, que são: os equipamentos são facilmente disponíveis; o processo é razoavelmente tolerante as variações químicas nos lodos; a resistência e a permeabilidade do produto final podem ser variadas pelo controle da quantidade de cimento adicionada; as técnicas de mistura de cimento são bem desenvolvidas; os aditivos são geralmente muito baratos e amplamente disponíveis; os equipamentos requeridos para o processo são simples para operar e amplamente disponíveis.

Guimarães (2017) avaliou a cinética dos contaminantes e otimização da Estabilização por Solidificação de lodo de curtume. Todos os tratamentos aplicados ao lodo de curtume foram aprovados quanto ao critério integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes concluindo, dessa forma, a eficiência do processo de E/S para o tratamento de resíduos sólidos.

2.5. Balanço de massa do processo de Estabilização por Solidificação

O balanço de massa possui a finalidade de verificar a estabilidade dos contaminantes existentes nas matrizes cimentícias, além de avaliar as características químicas das matrizes solidificadas. Brito (1999) e Leite (1997) realizaram o balanço de massa para determinar a atenuação em cada tratamento após a E/S em termos da massa de aplicação, lixiviação e acumulação do resíduo sólido de laboratório (RSL), conforme descrito na Equação 1.

$$\text{Massa}_{\text{Contam. Retida}} = \text{Massa}_{\text{Contam. (RSL Bruto)}} - \text{Massa}_{\text{Contam. (Tratado)}} \quad (1)$$

Onde:

$\text{Massa}_{\text{Contam. Retida}}$: Massa do contaminante retida na matriz do cimento; $\text{Massa}_{\text{Contam. (RSL Bruto)}}$: Massa do contaminante presente no RSL antes do tratamento em g; $\text{Massa}_{\text{Contam. (Tratado)}}$: Massa do contaminante presente no material E/S após o tratamento em gramas.

A Equação 2 será utilizada para o cálculo da eficiência de retenção dos contaminantes presentes no resíduo sólido de laboratório nas matrizes cimentícias.

$$X_{\text{EficiênciaRetenção}\%} = \left[1 - \left(1 + \frac{M_{\text{RSL (bruto)}}}{M_{\text{CPC}}} \right) \times \frac{[y]_{\text{Tratado}}}{[z]_{\text{Bruto}}} \right] \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$X_{\text{EficiênciaRetenção}\%}$: Eficiência de retenção dos contaminantes (%)

M RSL (bruto): Massa do contaminante presente no RSL bruto (sem tratamento) (kg)

MCP: Massa do cimento Portland comum (kg)

[y] Tratado: Concentração do contaminante após o tratamento por E/S (mg.kg^{-1})

[z] Bruto: Concentração do contaminante antes do tratamento por E/S (mg.kg^{-1}).

Leal (2008) aplicou o balanço de massa ao processo de E/S para determinar a eficiência de retenção de cromo e cádmio presentes no lodo primário de estação de tratamento de efluentes industriais em função da massa e concentração do resíduo (Lodo primário de ETE).

Utilizando os fatores tempo de cura (7, 14 e 28 dias) e percentagem de lodo (5, 25 e 45%), Leal (2008) concluiu através do balanço de massa que as melhores eficiências são para os fatores: 28 dias de preparação e 5% de lodo primário, para o cromo e cádmio. Enquanto que os piores resultados são para 7 dias e 45% de lodo. Ressalta-se a importância de se realizar o balanço de massa do processo de E/S para encontrar as proporções ideais de resíduo sólido, cimento e aglomerantes de modo a promover a retenção de metais pesados no interior da matriz sólida.

Rocha *et al.* (2010) aplicaram o balanço de massa ao processo de Estabilização por Solidificação visando o tratamento de Resíduo Sólido Sintético (RSS). O balanço de massa foi realizado levando em consideração as variáveis independentes: tipo de cura (ar livre e água) e percentagem de resíduo sólido sintético (10% e 20%).

Através do balanço de massa, Rocha *et al.* (2010) observaram que quanto maior o período de cura em água, menor a concentração de metais pesados presentes nas soluções do lixiviado. Concluiu que o balanço de massa é uma ferramenta primordial no tratamento do material E/S tendo em vista que somente através dele foi possível confirmar o método mais eficiente para a redução da periculosidade dos metais pesados analisados.

Rocha *et al.* (2010) também avaliaram a eficiência de retenção dos contaminantes em função das massas do RSS e do aglomerante, a concentração do RSS bruto e a concentração após o tratamento ser realizado. Observaram que a cura na água com 10% de RSS (tratamento B) foi o tratamento mais efetivo para reduzir a periculosidade do metal chumbo, apresentando maior eficiência de retenção do contaminante. Para Rocha *et al.* (2010) o balanço de massa é indispensável, pois, através dele é possível indicar se houve tratamento ou não.

Bandeira (2010), em seu trabalho “Atenuação de hidrocarbonetos totais de petróleo e óleo presentes em borra de petróleo usando aglomerantes à base de cimento e argila organofílica”, realizou o balanço de massa do processo de E/S para estudar a atenuação de hidrocarbonetos totais de petróleo e óleo presentes em borra de petróleo usando aglomerantes à base de cimento e argila organofílica.

Utilizando os fatores temperatura de cura (0, 20 e 40°C) e percentagem de resíduo sólido (10, 15 e 20%), Bandeira concluiu que o valor atenuado pode ser considerado satisfatório, pois a borra oleosa é um material altamente perigoso e a sua atenuação é fator decisivo para disposição e gerenciamento adequado. Desta maneira o balanço de massa mostrou que a massa de óleo e graxa foi reduzida, indicando a eficiência do processo de E/S no tratamento da borra oleosa de petróleo.

Bandeira (2010) também avaliou a retenção dos contaminantes em função das massas e concentrações dos resíduos e aglomerantes conforme a Equação 2, cujo objetivo foi avaliar e comparar se as massas dos agentes influenciam na eficiência de retenção dos contaminantes:

De acordo com Bandeira (2010), o balanço de massa é importante para se encontrar a proporção ideal na mistura entre resíduo e aglomerante nos materiais E/S encaminhados às diferentes rotas de destinação final. Concluiu que o balanço de massa aplicado ao processo de E/S para a análise de óleos e graxas, desempenhou um papel primordial para a avaliação de eficiência de retenção de elementos orgânicos, dando uma indicação de que os materiais empregados foram adequados no tratamento.

Oliveira (2012) realizou o balanço de massa do processo de E/S para determinar a eficiência de transformação em cada tratamento do processo de E/S em termos de aplicação, transformação e acumulação da massa do RSS. Os fatores adotados foram percentagem de resíduo sólido sintético (20% e 40%) e o tempo de cura da matriz sólida (14 dias e 28 dias).

Oliveira (2012) observou que a maior atenuação ocorreu para o tratamento CP2 (20% RSS e 28 dias de cura), onde foram atenuados 2976,87 mg do metal em função das massas aplicadas e lixiviadas. Em seu trabalho Oliveira (2012) constata a importância de se realizar o balanço de massa, pois através dele foi possível comprovar que a estabilização por solidificação foi adequada para tratar o resíduo sólido perigoso numa matriz de cimento sob diferentes condições de cura e percentagem do contaminante. Após o processo de E/S o resíduo perigoso Classe I foi convertido para Classe II, não perigoso, indicando a eficiência do processo de E/S.

Dias (2015), em seu trabalho “Otimização e limites de Avaliação Ambiental de materiais Estabilizados por Solidificação após a incorporação de borra oleosa de petróleo”, realizou o balanço de massa visando indicar limites máximos permissíveis de demanda química de oxigênio (DQO) e óleos e graxas, para avaliar materiais estabilizados por solidificação incorporados com borra oleosa de petróleo e otimizar as variáveis respostas.

Utilizando os fatores percentagem de borra oleosa (5, 12,5 e 20%) e tempo de cura (7, 17,5 e 28 dias), Dias observou que a menor atenuação ocorreu para o tratamento T₇ (12,5% BOP e 17,5 dias de cura) e a maior eficiência de transformação foi observada no tratamento T₁, onde neste tratamento se obteve uma eficiência 78,7%. Analogamente a Bandeira (2010), Dias (2015) também avaliou a eficiência de retenção de óleos e graxas presentes na borra oleosa de petróleo. Concluiu que à medida que se aumenta a massa da borra de petróleo, a eficiência de retenção diminui, tendo em vista que os contaminantes orgânicos podem afetar a cura das matrizes cimentícias, uma vez que estes contaminantes podem ser absorvidos pela superfície de cimento afetando a cinética de hidratação.

Bandeira (2010) e Dias (2015) alcançaram resultados semelhantes quando trataram a borra de petróleo aplicando o balanço de massa ao processo de E/S, obtendo eficiência de retenção superior a 62%. Concluíram que os resultados obtidos com a realização do balanço de massa são fundamentais para afirmar se a E/S é viável ou não para tratar resíduos oleosos.

Guimarães (2017) aplicou o balanço de massa dos contaminantes presentes no lodo de curtume visando verificar a estabilidade dos contaminantes existentes nas matrizes cimentícias bem como a avaliação química das matrizes solidificadas. Através da Equação 1, utilizando os fatores tempo (7, 28 e 90 dias) e percentagem de lodo (5,15 e 25%), concluiu que na medida em que se adicionou mais lodo de curtume ocorreu uma diminuição acentuada no balanço de massa, evidenciando influência do lodo incorporado nas matrizes cimentícias.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Infraestrutura

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos - LABGER, pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Química - UA EQ, 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.

3.2 Materiais

3.2.1 Drogarias e Reagentes

- Água destilada
- Ácido Acético Glacial – CAS nº 64-19-7
- Ácido Clorídrico PA – CAS nº 7647-01-0
- Ácido Sulfúrico PA – CAS nº 7664-93-9
- Hidróxido de Sódio - CAS nº 1310-73-2

3.2.2 Equipamentos e vidrarias

- Agitador magnético; agitador rotatório de frascos; balança analítica digital; banho-maria; bastão de vidro; becker; cápsulas de porcelana; destilador de água; dessecador; erlenmeyers; estufa; funil de separação; moldes cilíndricos; mufla; papel de filtro; pHmetro digital; pipeta; proveta; vidro relógio.

3.2.3 Aglomerantes e resíduos

- O cimento Portland usado foi do tipo: CP II-Z 32 (Elizabeth). De acordo com a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), esse tipo de cimento pode ser empregado em obras civis em geral, subterrâneas, marítimas e industriais. Sendo também utilizado na produção de argamassas, concreto simples, armado e

protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. O concreto feito com este produto é mais impermeável e por isso mais durável.

- A brita usada foi obtida no comércio da cidade de Campina Grande e classificada como número zero (0), agregado graúdo, após a análise granulométrica por peneiramento, pois sua granulometria encontra-se na faixa de 4,8 a 9,5 mm de acordo com a ABNT NBR 7211/2009.
- A areia utilizada foi obtida no comércio da cidade de Campina Grande/PB e realizou-se sua análise granulométrica por peneiramento de acordo com a ABNT NBR 7211/2009, classificando-a como sendo agregado miúdo, tendo em vista que sua granulometria está numa faixa de 0,075 mm a 4,8 mm de diâmetro.
- O resíduo perigoso foi do tipo Resíduo Sólido de Laboratório, proveniente dos laboratórios de Química Analítica e Química Geral.

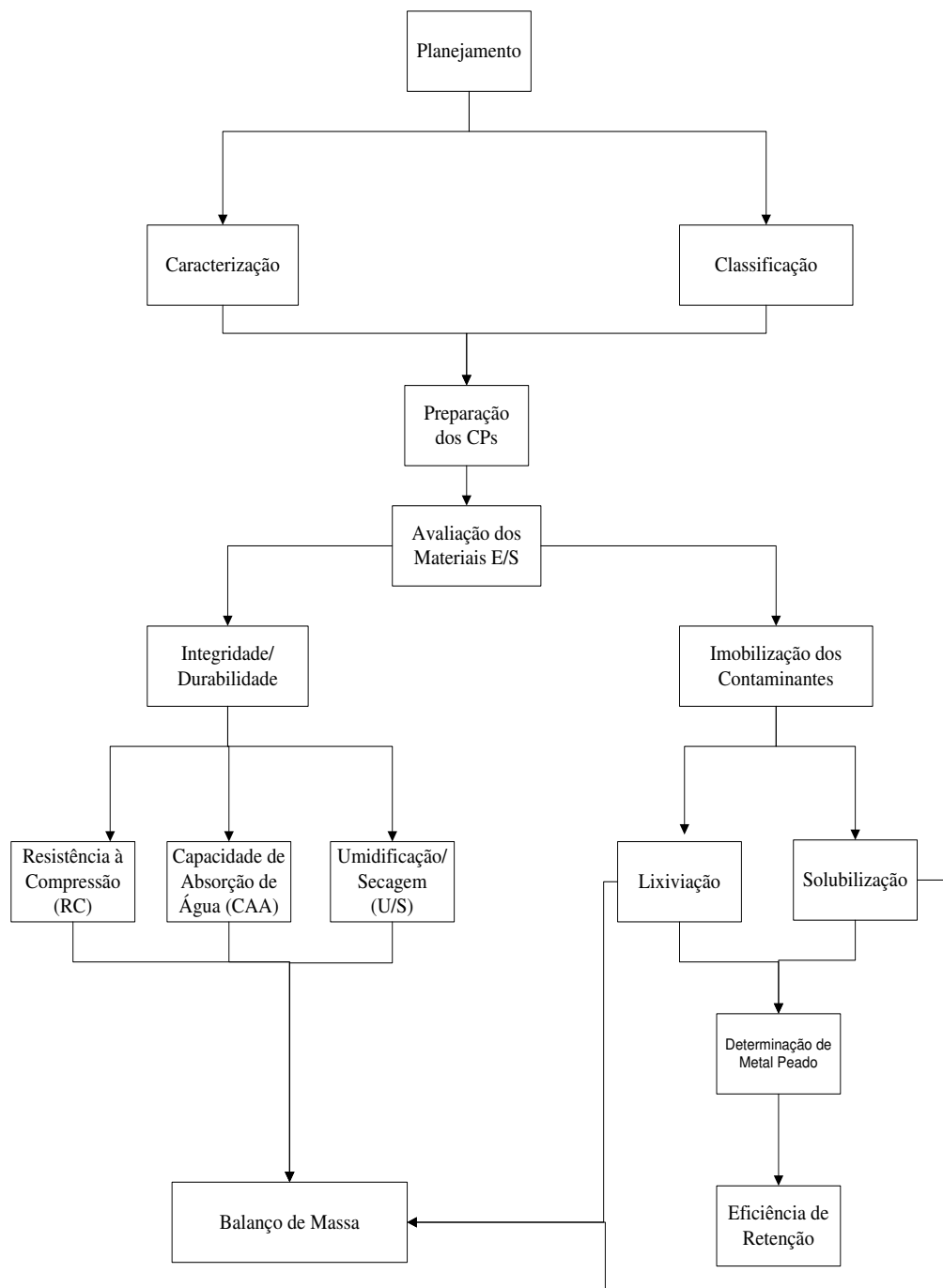
3.3 MÉTODOS

A presente pesquisa consistirá em seis etapas, seguindo a ordem:

- Planejamento experimental;
- Caracterização e classificação: RSL, cimento Portland, areia e brita;
- Preparação dos corpos de prova;
- Avaliação do material E/S: Integridade/Durabilidade e Imobilização dos contaminantes;
- Eficiência do processo de Estabilização por Solidificação;
- Balanço de massa dos metais pesados Cádmio e Níquel.

O Fluxograma 1 apresenta as etapas do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, desde o planejamento até as análises de laboratório.

Fluxograma 1: Fluxograma com as etapas realizadas na pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

A partir do Fluxograma 1, observa-se que a primeira etapa consistiu na realização do planejamento experimental que foi do tipo *one-way* com regressão. A segunda etapa foi

a caracterização e classificação do RSL, cimento, areia e brita. Em seguida foi realizada a preparação dos corpos de prova e a partir deles foram realizados os ensaios de resistência à compressão, capacidade de absorção de água, umidificação/secagem, lixiviação e solubilização. Por fim foi feito o cálculo da eficiência de retenção de cádmio e níquel no interior da matriz cimentícias e realizado o balanço de massa.

3.3.1 Planejamento experimental e análise estatística dos dados

O planejamento experimental consiste em um plano de pesquisa no qual o pesquisador controla e/ou manipula as variáveis do processo. O objetivo é obter informações suficientes com o menor número de ensaios possíveis e analisar se os dados obtidos são compatíveis com o projeto experimental. Através do planejamento experimental é possível melhorar o rendimento do processo, reduzir a variabilidade do processo, reduzir o tempo de processo e reduzir os custos de operação.

Neste trabalho foi adotada a análise de regressão ao planejamento *one-way*. O planejamento *one-way* é aquele onde existe apenas um fator de interesse pelo pesquisador. 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).

A regressão testa se os termos do modelo têm algum efeito na resposta, testa o linear, o quadrático e a interação. Os termos quadráticos indicam se há ou não curvatura (quadrática) na superfície de resposta. O erro (residual) mede quanto da variação da resposta não é explicado pelo modelo. Essa variação não explicada é subdividida em duas partes: *lack-of-fit* (é a variação devido à inadequação do modelo) e puro erro.

Um modelo de regressão linear pode descrever essa relação entre as variáveis de entrada com a variável de saída. Nesse trabalho foi usado como fator o percentual de resíduo sólido de laboratório (%RSL) e as respostas avaliadas foram: Capacidade de Absorção de Água (CAA), Resistência a Compressão (RC), Umidificação/Secagem (U/S) e Lixiviação.

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) para verificar se existe efeito significativo entre a percentagem de RSL e as variáveis respostas. Neste trabalho foi fixado o tempo de cura igual a 28 dias. Os metais analisados foram Cádmio e Níquel.

A Tabela 2 mostra o fator usado na pesquisa, o percentual de RSL, a quantidade de resíduo sólido de laboratório, quantidade de cimento, volume de água, massa de areia e massa de brita. Na pesquisa foram realizadas três repetições.

Tabela 2: Planejamento do Experimento.

| % de RSL(Fator) | Massa de RSL(g) | Massa de Cimento(g) | Massa de Areia(g) | Massa de Brita(g) | Volume de Água(mL) |
|------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 0 | 0,0 | 75,0 | 262,5 | 112,5 | 60 |
| 0 | 0,0 | 75,0 | 262,5 | 112,5 | 60 |
| 0 | 0,0 | 75,0 | 262,5 | 112,5 | 60 |
| 10 | 7,5 | 75,0 | 255,0 | 112,5 | 60 |
| 10 | 7,5 | 75,0 | 255,0 | 112,5 | 60 |
| 10 | 7,5 | 75,0 | 255,0 | 112,5 | 60 |
| 30 | 22,5 | 75,0 | 240,0 | 112,5 | 60 |
| 30 | 22,5 | 75,0 | 240,0 | 112,5 | 60 |
| 30 | 22,5 | 75,0 | 240,0 | 112,5 | 60 |
| 45 | 33,8 | 75,0 | 228,8 | 112,5 | 60 |
| 45 | 33,8 | 75,0 | 228,8 | 112,5 | 60 |
| 45 | 33,8 | 75,0 | 228,8 | 112,5 | 60 |

Nota: %RSL: Porcentagem de resíduo sólido de laboratório.

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A verificação do modelo proposto da regressão linear foi feita 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): $\beta_1 = 0$; em que as médias dos tratamentos são todas iguais a determinado nível de significância, não havendo efeito na resposta.
- 2ª Hipótese: Hipótese Alternativa (H_a): $\beta_1 \neq 0$; em que pelo menos uma média é diferente entre si a determinado nível de significância, havendo efeito na resposta.

Será aplicado o teste F e/ou o teste P a partir da ANOVA para comparar as médias. Se o valor de $P \leq 0,05$, as médias dos tratamentos são diferentes, ou seja, houve efeito do fator e a variável controlável influenciou na variável resposta.

Se o valor de $P > 0,05$, as médias dos tratamentos não são diferentes. Isto é, não haverá efeito do fator e a variável controlável não influenciará na variável resposta. Neste trabalho foi adotada uma probabilidade (nível de significância) de $\alpha = 0,05$ (5%).

Foram observadas essas hipóteses quanto à significância da regressão, onde 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). Enquanto que 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 3.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (3)$$

Onde:

β_0 e β_1 são os parâmetros do modelo

(ε) é o erro aleatório associado à determinação de y

Y representa a resposta

x é o percentual de resíduo sólido de laboratório.

A Tabela 3 mostra a saída computacional do *Minitab17.0*, para a análise de regressão.

Tabela 3: Análise de variância (ANOVA).

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

Nota: Valor p^1 : Significativamente diferente ($p \leq 0,05$); 2 Não significativo ($p > 0,05$); n: Número de observação.

Fonte: MINITAB 17.0(2014).

O coeficiente de determinação R^2 representa a variação explicável pelo modelo, ou seja, o quanto o modelo explica a variação dos dados pelo uso dos regressores x_1, x_2, \dots, x_k (MONTGOMERY e RUNGER, 2003). O coeficiente de determinação é calculado usando-se a Equação 4.

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad (4)$$

Onde:

R²: Coeficiente de determinação;

SQR: Soma de quadrados da regressão;

SQT: Soma de quadrados totais.

A porcentagem máxima de variação explicável é calculada usando a Equação 5. Ela representa o máximo de variação que o modelo explica. Este valor deve ser comparado com o valor explicado pelo modelo (R²).

$$R_{max}^2 = \frac{SQ_{Total} - SQ_{erro_puro}}{SQ_{Total}} \quad (5)$$

Foi utilizado o *Software Minitab 17.0*, que incorpora uma série de recursos de manipulação de dados, análise de confiabilidade, confecção de gráficos e rotinas de análise estatística (MINITAB 17.0, 2014).

3.3.2 Caracterização e classificação do RSL, cimento, areia e brita

O RSL utilizado foi coletado nos laboratórios de Química Geral e Química Analítica do curso de Engenharia Química pertencentes à Universidade Federal de Campina Grande, no campus localizado na cidade de Campina Grande, Paraíba.

O aglomerante utilizado no processo de E/S foi o Cimento Portland CII – Z32 da Elizabeth, o qual apresenta como resistência à compressão de 32 MPa garantidos após 28 dias de tempo de cura. A sigla Z 32 significa que o cimento contém adição de material pozolânico que varia de 6% a 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade (ABNT - NBR 11578, 1991).

O cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece em contato com água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais (ABCP, 2002).

Segundo Brito (2007), o resíduo, o cimento e os aglomerantes devem ser caracterizados em termos de suas características iniciais como, teor de sólidos e suas

frações (STANDARD METHODS, 1998), umidade (STANDARD METHODS, 1998) e pH (WTC, 1991). A classificação deste resíduo foi realizada através da determinação de metais a partir do extrato lixiviado e/ou solubilizado (ABNT NBR 10.005, 2005; ABNT NBR 10.005, 2004; ABNT NBR 10.006, 2004).

3.3.3 Confeção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram preparados seguindo as etapas propostas pela NBR 7215 (ABNT, 1996) e o Protocolo de avaliação de materiais E/S (BRITO, 2007). Para descobrir a percentagem % adequada de RSL para aplicação da E/S foram realizados testes preliminares visando classificar e caracterizar o material.

A Tabela 4 apresenta os aspectos operacionais estabelecidos no Protocolo de Avaliação de Materiais Estabilizados por Solidificação considerados para a preparação dos corpos de prova proposto por Brito (2007). Estes aspectos estão relacionados com as condições básicas para a realização dos ensaios em laboratório.

Tabela 4: Aspectos Operacionais.

| Aspectos Operacionais | Parâmetros |
|----------------------------------|------------------------------------|
| Tempo de preparação das amostras | 28 dias |
| Formato do molde | Cilíndrico |
| Dimensão do molde | 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura |
| Tempo de moldagem | 24 horas |
| Umidade relativa do laboratório | entre 50 a 100 % |
| Temperatura do laboratório | 24 ± 4 °C |

Fonte: BRITO (2007)

A preparação dos corpos de prova (CP) foi realizada utilizando-se dos seguintes constituintes: cimento Portland CP II – Z32, areia fina, brita, RSL e água, em proporções para corpos de prova (CP) de 450g e obedecendo a um traço de 1:5, mantendo-se constante o tempo de cura de 28 dias e variando a porcentagem de resíduo. O RSL e os aglomerantes foram pesados, separadamente, em uma balança analítica com precisão de 0,01 g.

Para o cálculo das quantidades exatas de cada componente do corpo de prova utilizou-se de 1 parte de cimento e 5 partes de aglomerantes seguindo o procedimento matemático abaixo. O volume de água adicionada foi de 60 mL. Os cálculos para 10% de

RSL, com um traço de 1:5 são apresentados a seguir. Para 30% e 45% de RSL foi adotado o mesmo raciocínio.

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

$$\text{Massa do CPC} = 450\text{g}/6 = 75\text{g de cimento}$$

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

$$\text{Massa do RSL} = 75 \times 10\%$$

$$\text{Massa do RSL} = 7,5\text{g}$$

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

$$\text{Massa de brita} = 375 \times 30\%$$

$$\text{Massa de brita} = 112,5 \text{ g}$$

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

$$\text{Massa de areia} = 375 - 7,5 - 112,5$$

$$\text{Massa de areia} = 255 \text{ g de areia.}$$

Após a pesagem individual dos constituintes (Figura 3A), os mesmos foram homogeneizados em presença de água de modo a favorecer a reação química do cimento, obtendo uma massa homogênea (Figura 3B). O interior dos moldes foi devidamente lubrificado com óleo mineral visando facilitar o desmolde do corpo de prova.

Em seguida, a massa homogênea das matrizes cimentícias foi colocada no interior dos moldes cilíndricos, em camadas compactadas para evitar a formação de espaços vazios no corpo de prova. Placas de vidro de 70 mm por 70 mm de aresta e 5 mm de espessura, foram lubrificadas com óleo mineral, e colocadas na superfície dos moldes, para evitar a perda de água ocasionada por evaporação (Figura 3C).

O material ficou em repouso por um período de 24 horas para o endurecimento da pasta. Por fim, após o período de 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e curados (Figura 3D) para finalmente serem realizados os ensaios referentes aos critérios de integridade e durabilidade e imobilização após o tempo de cura.

Figura 2: Etapas da preparação dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

3.3.4 Integridade e durabilidade do material E/S

O Protocolo de Avaliação de Materiais E/S proposto por Brito (2007) apresenta-se como uma ferramenta importante para avaliar os critérios de integridade/durabilidade, além de mostrar as rotas de disposição dos resíduos tratados por E/S.

De acordo com a ABNT – NBR 7215/1996 os critérios de integridade e durabilidade incluem:

- ✓ Ensaio de Resistência à Compressão (RC);
- ✓ Capacidade de Absorção de Água (CAA);

Umidificação e Secagem (U/S).

3.3.4.1 Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão (RC) foi realizado conforme ABNT (1996) - NBR 7215, específica para avaliar o cimento Portland. Este ensaio é usado para verificar a capacidade do material E/S em resistir a diferentes cargas de compressão mecânica. O ensaio depende do pH da matriz solidificada, do tempo de cura, do teor de umidade e da temperatura.

No ensaio de RC (Figura 3) foram utilizadas matrizes cimentícias cilíndricas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Cada uma delas foi posta diretamente sobre o prato inferior de uma prensa de modo a ficar rigorosamente centrado em relação ao eixo de carregamento. O parâmetro RC será calculado mediante a Equação 5, em kgf/cm², onde será obtido dividindo a carga de ruptura pela área da seção do corpo de prova (ABNT NBR 7215, 1996).

$$RC = \left[\frac{F}{A} \right] \quad (6)$$

Onde:

RC: Resistência à compressão em kgf/cm²;

F: Força de ruptura dos corpos de prova em kgf;

Área: Área de seção dos corpos de provas em cm².

Figura 3: Dinamômetro utilizado para o ensaio de RC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Conforme Pablos e Sichieri (2008), a resistência à compressão é importante para utilização e/ou disposição de resíduos E/S, para informar sobre a possível fragmentação durante a utilização ou disposição.

De acordo com Brito (2007), através da resistência mecânica do material E/S pode-se definir a rota de destinação do material E/S, conforme a Tabela 5. Este pode ser utilizado 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.

Tabela 5: Utilização do material E/S

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

Nota:

¹Valor recomendado por SPENCE e SHI (2005)

²Valor indicado para bloco vazado de concreto segundo ABNT NBR 7215 (1996)

³Valor para material em obras de pavimentação segundo MULDER (2002)

⁴Valor para fabricação de tijolos maciços conforme ABNT NBR 7170 (1983 d)

⁵Valor para confecção de peças de concreto conforme ABNT 6136 (1994)

Fonte: Brito,2007

3.3.4.2 Capacidade de Absorção de Água

O ensaio de Capacidade de Absorção de Água (CAA) será realizado conforme a NBR 9778 ABNT (1987), sendo esta norma utilizada para argamassa e concreto endurecidos, quando o objetivo é a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, que avalia a porosidade do material endurecido ou E/S.

Segundo Stegemann e Côté (1990), o aumento da absorção de água diminui a resistência à compressão e, conseqüentemente, aumenta a lixiviação. O ensaio recomenda pesar os corpos de prova e em seguida levar à estufa a 105°C por 24 horas. Posteriormente as amostras serão retiradas da estufa, pesadas e 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-se resfriar, pela perda natural de calor até temperatura ambiente e foi feita a última pesagem.

O resultado, portanto, será expresso em % (Equação 7) conhecendo-se a massa do corpo de prova após saturação em água e a massa do corpo de prova seca em estufa, conforme a Figura 4.

$$CAA = \frac{Msat - Ms}{Ms} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

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

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

Figura 4: Ensaio de Capacidade de Absorção de Água.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Conforme Brito (2007), para ser aprovado no ensaio de capacidade de absorção de água e considerado como material E/S, a CAA obtida não pode exceder 40%.

3.3.4.3 Umidificação e Secagem

O ensaio de umidificação/secagem (Figura 5) será realizado para simular e avaliar o material resultante do procedimento de E/S, em relação à sua capacidade em resistir às variações de mudanças de estado, visando avaliar a durabilidade a longo prazo e a perda de massa após sucessivos períodos de umidificação/secagem.

O método consiste em pesar os corpos de prova que serão submetidos a seis ciclos da seguinte forma: umidificação com água deionizada, na proporção 2:1 em relação à massa da amostra natural; secagem em estufa a temperatura de 80°C por 24 horas para

evaporação total da água; resfriamento em dessecador e pesagem (Pciclo i). Através da Equação 8 calculou-se a perda de peso da amostra após os 6 ciclos (BRITO, 2007).

$$\text{Perda de Peso (\%)} = \frac{P_{\text{nat}} - P_{\text{ciclo } i}}{P_{\text{nat}}} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

P_{nat} = Peso da amostra natural;

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

Figura 5: Ensaio de Umidificação/Secagem.



LEGENDA: Estufas utilizadas no ensaio de U/S (A); Ensaio de U/S (B).

Fonte: LABGER, 2018.

3.3.5 Análise ambiental e imobilização dos contaminantes

3.3.5.1 Lixiviação

O ensaio de lixiviação foi utilizado para avaliar a imobilização dos contaminantes, ou seja, avaliar o potencial do resíduo em liberar contaminante para o meio ambiente. A norma da ABNT NBR 10004 (2004) define a lixiviação como sendo o processo para a determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, através da dissolução no meio extrator.

Foi avaliado o extrato lixiviado resultante do aglomerante, do RSL, da areia e das matrizes cimentícias. Os dados foram comparados com os requisitos exigíveis fixados pela NBR 10.005 (ABNT, 2004), para assim classifica-los ambientalmente (Classe I – perigosos ou Classe II - não perigosos).

Para a realização do ensaio de lixiviação, 100 g de uma amostra foi colocada em um frasco de 2000 ml com água destilada, isenta de matéria orgânica mais a solução

lixiviante (ácido acético glacial e água). A solução foi submetida à agitação em equipamento rotativo com 30 rotações por minuto por um período de 18 ± 2 horas.

A Figura 6 apresenta o equipamento que foi utilizado para realizar o ensaio de lixiviação. A metodologia para obtenção do extrato lixiviado está descrita no Anexo A.

Figura 6: Equipamento rotativo de frascos para o ensaio de lixiviação.



Fonte: LABGER, 2018.

3.3.5.2 Solubilização

O teste de solubilização adotado foi descrito pela norma ABNT NBR: 10.006:2004 (Anexo B). É utilizado para avaliar o potencial do resíduo em liberar contaminante para o meio ambiente quando em contato com água.

A realização desse ensaio ocorreu misturando cada amostra com água destilada na proporção constante de 1:4 em relação à amostra e a água destilada, sob baixa agitação durante 5 minutos. O recipiente foi coberto com filme de PVC, ficando em repouso durante 7 dias a temperatura de 25°C . Após esse tempo, a solução foi filtrada de modo a obter o extrato solubilizado através do qual foi possível determinar pH, e o teor de cádmio e níquel. No filtrado (extrato solubilizado) a concentração de metais será determinada num espectrofotômetro de absorção atômica da marca Shimadzu Modelo AA - 6800.

Figura 7: Ensaio de Solubilização.

Fonte: LABGER, 2018.

3.3.6. Eficiência de retenção dos contaminantes

A eficiência do processo de Estabilização por Solidificação foi realizada em função da massa do contaminante presente no resíduo sólido de laboratório, bem como, a massa do aglomerante e a massa do contaminante após o tratamento de E/S através da Equação 9. O objetivo foi avaliar e comparar as massas dos agentes que influenciaram na eficiência de retenção dos contaminantes (BRITO, 2007):

$$X_{\text{EficiênciaRetenção}\%} = \left[1 - \left(1 + \frac{M_{\text{RSL (bruto)}}}{M_{\text{CPC}}} \right) x \frac{[y]_{\text{Tratado}}}{[z]_{\text{Bruto}}} \right] x 100 \quad (9)$$

Onde:

$X_{\text{EficiênciaRetenção}\%}$: Eficiência de retenção dos contaminantes (%)

M RSL (bruto): Massa do contaminante presente no RSL bruto (sem tratamento) (kg)

MCP: Massa do cimento Portland comum (kg)

[y] Tratado: Concentração do contaminante após o tratamento por E/S (mg.kg^{-1})

[z] Bruto: Concentração do contaminante antes do tratamento por E/S (mg.kg^{-1}).

3.3.7. Balanço de massa do processo de E/S

O balanço de massa foi realizado para os contaminantes Níquel e Cádmiu, visando determinar a atenuação em cada tratamento após a estabilização por solidificação

em termos da massa de aplicação, lixiviação e acumulação da borra oleosa de petróleo (BRITO, 1999; LEITE; 1997). O balanço de massa foi calculado através da Equação 10:

$$\text{Massa Contam.Retida} = \text{Massa Contam. (RSL Bruto)} - \text{Massa Contam. (Tratado)} \quad (10)$$

Onde:

$\text{Massa}_{\text{Contam. Retida}}$: Massa do contaminante retida na matriz do cimento;

$\text{Massa}_{\text{Contam. (RSL Bruto)}}$: Massa do contaminante presente no RSL antes do tratamento em g;

$\text{Massa}_{\text{Contam. (Tratado)}}$: Massa do contaminante presente no material E/S após o tratamento em g.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção estão apresentados os resultados e discussões referentes à caracterização e classificação dos materiais e aos ensaios realizados para avaliar a integridade, durabilidade e imobilização dos contaminantes. A caracterização do Resíduo Sólido de Laboratório teve como objetivo obter informações referentes ao seu aspecto físico-químico através da avaliação do teor de Umidade, Sólidos e suas frações e pH conforme as recomendações de APHA (2005).

A determinação dos sólidos totais, fixos e voláteis permite verificar o teor de matéria orgânica e inorgânica presente no resíduo, bem como os elementos que não se volatilizam à temperatura de 550°C.

Segundo Oliveira (2003), quando se trata de resíduos orgânicos é importante que se analise a parcela de fração orgânica através da determinação da parcela volátil. A classificação do RSL, cimento, areia e brita foi realizada usando a norma da ABNT – NBR 10004, 10005 e 10006 aplicadas aos extratos lixiviados.

4.1. Caracterização do cimento Portland, RSL, areia e brita

A Tabela 6 apresenta os valores referentes ao teor de umidade, sólidos e suas frações e pH para o RSL, cimento, areia e brita.

Tabela 6 : Caracterização do cimento CIMPOR - CP II- Z 32, da areia, do RSL e da brita.

| PARÂMETRO | ST | STF* | STV* | U | pH |
|------------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | % | | | | |
| CP II-Z32 - ELIZABETH | 99,25 | 98,97 | 1,03 | 0,75 | 13,58 |
| AREIA | 99,92 | 96,70 | 3,30 | 0,08 | 6,53 |
| RSL | 87,57 | 79,00% | 20,26 | 12,43 | 4,87 |
| BRITA | 99,98 | 0,10 | 99,90 | 0,02 | - |

Nota: ST: Sólidos Totais; SF: Sólidos Totais Fixos; SV: Sólidos Totais Voláteis; U: Umidade; RSL: Resíduo sólido de laboratório; *Valor em função dos sólidos totais. Fonte: Dados da Pesquisa (2018).

A concentração de sólidos totais obtida para o RSL foi de 87,57% e indica a quantidade total de matéria orgânica e inorgânica presente no resíduo. O teor de sólidos totais fixos do RSL foi de 79,0%. Este valor indica que o resíduo sólido de laboratório apresenta elevada massa inorgânica a ser tratada. Do total de sólidos totais presentes na massa de RSL, 20,26% é composto por material orgânico. O teor de umidade do RSL foi de 12,43%. Como o resíduo apresentou baixo teor de umidade, é considerado viável para o tratamento por E/S, tendo em vista que o excesso de água pode separar os agentes aglomerantes e dificultar as reações entre o RSL e os agentes solidificantes.

O pH do RSL apresentou valor 4,87 indicando a acidez do mesmo. A brita utilizada apresenta em sua constituição 99,98% de sólidos totais, do teor de sólidos totais 99,90% corresponde aos sólidos totais voláteis, indicando que a mesma é constituída basicamente por matéria orgânica.

A areia apresentou teor de sólidos totais igual a 99,92%, enquanto que a umidade apresentou 0,08%. Os resultados encontrados estão de acordo com as pesquisas de Guimarães (2017) e Souza e Brito (2011), que encontraram valores referentes a umidade de 0,2% e 0,76%, respectivamente.

O cimento utilizado apresentou teor de sólidos totais igual a 99,25% e 98,97% de sólidos totais fixos, esta quantidade elevada pode ser explicada por meio da composição química do aglomerante. O teor de umidade para o cimento foi inferior a 1%. A baixa umidade do cimento é responsável pela facilidade com que ocorrem as reações químicas entre aglomerante e o RSL.

A Tabela 7 apresenta alguns dados de caracterização do cimento Portland obtidos com relação aos valores de umidade, sólidos e suas frações e pH através da técnica de estabilização por solidificação.

Tabela 7: Caracterização físico-química do cimento Portland.

| PARÂMETRO | % ST | % STV* | % STF* | % U | pH |
|-------------------------|-------------|---------------|---------------|------------|-----------|
| Guimarães (2008) | 98,20 | 1,10 | 98,90 | 1,00 | - |
| Dias (2010) | 99,62 | 1,04 | 98,96 | 0,36 | 12,36 |
| Oliveira (2012) | 99,82 | 1,53 | 98,46 | 1,83 | 13,24 |
| Guimarães (2017) | 98,20 | 1,10 | 98,90 | 1,81 | 8,20 |

Nota: ST: Sólidos Totais; SF: Sólidos Totais Fixos; SV: Sólidos Totais Voláteis; U: Umidade; RSL: Resíduo sólido de laboratório; *Valor em função dos sólidos totais. Fonte: GUIMARÃES (2008); DIAS (2010); OLIVEIRA (2012); GUIMARÃES (2017).

4.2. Classificação do cimento Portland, areia, brita e RSL

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados da classificação do cimento Portland, do Resíduo Sólido de Laboratório, areia e brita, além dos valores referentes aos metais e seus valores quantificados em mg.L^{-1} e o limite máximo permissível (LMP) para cada metal. A presente pesquisa realizou o tratamento dos metais pesados cádmio e níquel.

Tabela 8: Teor de metais pesados: Extrato lixiviado do RSL, do Cimento Portland, da areia e da brita.

| Metal | Valor (mg.L^{-1}) | | | | Limite Máximo Permissível (LMP) (mg.L^{-1}) | Limite Máximo Permissível (LMP) (mg.kg^{-1}) |
|------------------------------|-------------------------------|------------------|------------|------------|--|---|
| | Resíduo Sólido de Laboratório | Cimento Portland | Areia | Brita | | |
| Alumínio ⁽²⁾ | 36,8 | 0,1 | - | - | 0,2 | 4 |
| Bário | 0,11 | - | - | - | 70 | 1400 |
| Chumbo ⁽¹⁾ | 0,51 | 0,44 | 0,2 | 0,18 | 1,0 | 20 |
| Manganês | 42,2 | - | - | - | 0,1 | 2,0 |
| Cobalto ⁽⁴⁾ | 195 | 0,15 | - | - | 1,0 | - |
| Zinco ⁽³⁾ | 397 | 0,1 | 0,15 | 0,13 | 5,0 | 100 |
| Sódio | 1131 | - | - | - | 200 | - |
| Cobre ⁽³⁾ | 350 | 0,1 | 0,1 | 0,14 | 2,0 | 40 |
| Ferro ⁽³⁾ | 3,15 | 0,20 | - | - | 0,3 | 6,0 |
| Níquel ⁽³⁾ | 193 | 0,23 | 0,1 | - | 0,02 | 0,4 |
| Cromo ⁽¹⁾ | 114 | 0,54 | - | - | 5,0 | 100 |
| Cádmio ⁽¹⁾ | 109 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,5 | 10 |

Nota: ¹ Parâmetros e limites máximos no extrato lixiviado e solubilizado conforme recomendação da ABNT NBR 10005 (2004b) e ABNT NBR 10006 (2004c) e CFR (2003). ² Valores baseados no Ministério da Saúde (MS) - Portaria N. 518 de 2004 (MS, 2004) ³ Valores sugeridos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) - Portaria N0 195 de 2005 (CETESB, 2005) ⁴ Valores sugeridos pela NT - 202 R.10 - Norma técnica FEEMA: Padrões de lançamento de efluentes líquidos.

Na Tabela 8 observa-se através do extrato lixiviado do resíduo sólido de laboratório que o Cádmio e o Níquel apresentaram valores superiores aos limites máximos permissíveis fixados pelas normas ABNT NBR 10.005 (2004b), ABNT NBR 10006 (2004c), CFR (2003) e pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - (CETESB, 2005). O extrato lixiviado do RSL apresentou uma concentração do metal níquel de 193 mg.L^{-1} e de cádmio 109 mg.L^{-1} .

Segundo os valores sugeridos pela ABNT e pela Companhia de Tecnologia de saneamento ambiental (CETESB), o máximo teor permissível do metal no extrato lixiviado deve ser de 0,02 mg.L⁻¹ para o níquel e de 0,5 mg.L⁻¹ para o cádmio, respectivamente.

Como pelo menos um dos parâmetros do RSL apresentou uma concentração maior do que a estabelecida pelos padrões máximos permissíveis, este pode ser classificado como resíduo perigoso, Classe I. Os mesmos são perigosos devido à toxicidade de acordo com a Norma NBR 10.0005 (ABNT, 2004).

Ainda de acordo com a Tabela 8 observar-se que o cimento e a areia apresentaram em sua constituição o teor de níquel acima do limite máximo permissível, apresentando-se como materiais contaminados embora em menor proporção. As reações de hidratação que ocorrem entre o cimento e a água promovem a fixação destes metais na molécula do cimento, ficando retidos no interior da matriz sólida obtida.

4.3 Avaliação da Integridade e Durabilidade dos Materiais E/S

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de Integridade e Durabilidade dos materiais E/S. Para ser aprovado, o material deverá ser aprovado nos ensaios de resistência à compressão, umidificação/secagem e capacidade de absorção de água.

4.3.1 Resistência à Compressão

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de RC referentes as triplicatas realizadas no experimento.

Tabela 9: Resultados do Ensaio de RC para os corpos de prova preparados.

| Tratamento | Fator A % RSL | RC (kgf/cm ²) | RC (MPa) |
|------------|---------------|---------------------------|----------|
| 01 | 10 | 47,06 | 4,62 |
| 02 | 10 | 38,66 | 3,79 |
| 03 | 10 | 53,63 | 5,26 |
| 04 | 30 | 20,84 | 2,04 |
| 05 | 30 | 23,89 | 2,16 |
| 06 | 30 | 22,01 | 2,34 |
| 07 | 45 | 15,38 | 1,51 |
| 08 | 45 | 22,99 | 1,35 |
| 09 | 45 | 25,11 | 1,46 |

Nota: %RSL: Percentagem de resíduo sólido de laboratório; RC: Resistência à Compressão.

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Conforme a Tabela 9 observa-se que os melhores valores de resistência à compressão foram obtidos para os tratamentos 01, 02 e 03, todos com tempo de cura de 28 dias e uma porcentagem de RSL igual a 10%. Para os demais tratamentos realizados para 30 e 45% de RSL, os resultados também foram satisfatórios, apresentando-se acima do limite mínimo permissível (1MPa) requerido para disposição em aterro sanitário.

Com isto, o material obtido foi aprovado e pode ser descartado em aterro sanitário de forma segura e eficaz no que diz respeito a sua resistência. A referência maior que 1MPa foi sugerida por Brito (2007) no “Protocolo de Avaliação de Materiais Resultantes da Estabilização por Solidificação de Resíduos” e é o mesmo valor adotado na Holanda e na França para materiais E/S.

A maior Resistência à Compressão obtida foi a do corpo de prova correspondente ao tratamento 03, em que foi adicionado 10% de RSL e um tempo de cura de 28 dias. Observa-se ainda que, os maiores valores para a resistência à compressão foram obtidos quando se utilizou uma menor porcentagem de resíduo. Esse comportamento também foi observado por HEREK *et al.* (2005), SOUSA (2009), ANDRADE *et al.* (2014), GUIMARÃES (2017).

Souza (2009) realizou ensaios de RC para materiais E/S com diferentes percentuais de resíduo sólido (0, 10, 20 e 30%). Os menores resultados (2,41 e 2,32MPa) foram obtidos para os corpos de prova com os maiores percentuais de resíduo (20 e 30%).

Da mesma forma, Andrade *et al.* (2015) analisou diferentes porcentagens de resíduos (10 e 20%) e diferentes tempos de cura (14 e 28 dias). Observou que os melhores valores de resistência à compressão foram obtidos pelos tratamentos de menor porcentagem de borra oleosa de petróleo, alcançando uma média de 0,725 MPa, independentemente do tempo de cura adotado.

De acordo com Herek *et al.* (2005) ao avaliar blocos cerâmicos em termos de resistência à compressão constataram que à medida em que se aumentou a porcentagem de lodo, a resistência a compressão foi diminuindo. Segundo os autores, a diminuição da resistência à compressão pode ter ocorrido devido a presença de fibras têxteis no lodo, que podem ter prejudicado as reações de hidratação do cimento responsáveis pela resistência.

Guimarães (2017) avaliou a resistência à compressão do material obtido para diferentes percentuais de lodo de curtume (5, 15 e 25%) e diferentes tempos de cura (7, 28 e 90 dias).

Em sua pesquisa Guimarães (2017) constatou que os melhores resultados obtidos foram para a menor percentagem de lodo de curtume, onde obteve resistência à compressão média de 6,59MPa, e resistências menores a partir da adição de quantidades mais elevadas de lodo de curtume.

A Tabela 10 apresenta a análise estatística dos resultados para o ensaio de Resistência à Compressão.

Tabela 10: Avaliação estatística dos dados para os ensaios de RC.

| Fontes de Variação | G. L | Soma do Quadrado (SQ) | Quadrado Médio (QM) | Valor F (QMR/QME) | Valor P |
|----------------------|------|-----------------------|---------------------|-------------------|---------|
| Regressão | 2 | 61,2421 | 30,6211 | 123,57 | 0,000 |
| Erro Residual | 9 | 2,2302 | 0,2478 | | |
| Curvatura | 1 | 9,5656 | 9,5656 | | 0,000 |
| Total | 12 | 73,0379 | | | |
| $R^2 = 95,7\%$ | | $R^2_{\max} = 96,5\%$ | | | |

Nota: G.L: Graus de liberdade;

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Conforme a Tabela 10, observa-se que a ANOVA apresentou valor de P igual a 0,000 que é menor do que o nível de significância adotado (0,05). Com isto pode-se afirmar, então, com 95% de confiança, que as médias dos tratamentos (10, 30 e 45% de RSL) são diferentes entre si.

Observa-se que o valor de F calculado (123,57) foi maior do que o F tabelado (4,26). Deste modo, rejeita-se a hipótese nula (H_0) e o fator percentagem de resíduo sólido de laboratório influenciou na variável resposta (RC).

Ainda de acordo com a Tabela 10, o valor do coeficiente de determinação (R^2) foi igual a 95,7%, ou seja, 95,7% dos dados são explicados pelo modelo. A percentagem máxima explicável (R^2_{\max}) foi de 96,5%. Os 3,5% restantes não podem ser explicados pelo modelo, são erros atribuídos à aleatoriedade do experimento.

A partir da ANOVA pode-se obter o modelo para a regressão conforme a Equação 11.

$$\hat{Y}_{RC}(\text{MPa}) = 7,531 - 0,3167\%RSL + 0,004396\%RSL^2 \quad (11)$$

O modelo acima conseguiu explicar em nível máximo 96,5% dos dados para a Resistência à Compressão. Para o teste de curvatura, observa-se que o valor de P (0,000) é menor que 0,05. Então há curvatura e o modelo adotado foi o quadrático, pois foi o que mais se ajustou aos dados dos experimentos.

Segundo Brito (2007) para ser considerado estabilizado por solidificação o material deverá ser aprovado, além do ensaio de RC, nos ensaios de capacidade de absorção de água e umidificação/secagem, também deverá ser aprovado nos ensaios de lixiviação e solubilização.

4.3.2 Capacidade de Absorção de Água (CAA)

A Tabela 11 apresenta os resultados referentes aos corpos de prova preparados com 10, 30 e 45% de RSL e um tempo de cura fixo de 28 dias para os ensaios de CAA.

Tabela 11: Ensaio de CAA para os corpos de prova preparados.

| Tratamento | Fator A % RSL | Variável Resposta CAA (%) |
|-------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| 01 | 10% | 6,59 |
| 02 | 10% | 6,97 |
| 03 | 10% | 6,99 |
| 04 | 30% | 7,29 |
| 05 | 30% | 7,33 |
| 06 | 30% | 7,34 |
| 07 | 45% | 7,49 |
| 08 | 45% | 7,51 |
| 09 | 45% | 7,54 |

Nota: %RSL: porcentagem de Resíduo Sólido de Laboratório; CAA: Capacidade de Absorção de Água.

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Segundo a Tabela 11 à medida em que se aumenta a porcentagem de RSL tem-se um aumento na capacidade de absorção de água para o tempo de cura fixo de 28 dias,

possibilitando desse modo maior capacidade de lixiviar os contaminantes presentes no RSL. Todos os resultados obtidos encontram-se em conformidade com a NBR 9778-1987, os quais apresentaram porcentagem de absorção de água inferior a 40%.

Os corpos de prova avaliados apresentaram baixos valores para a CAA nas condições de 10, 30 e 45% de RSL para o tempo de cura fixo de 28 dias. Estes resultados indicam que o material E/S apresenta baixa porosidade favorecendo, desta forma, o controle da lixiviação dos contaminantes presentes no Resíduo Sólido de Laboratório para o meio.

De acordo com Brito (2007), a absorção de água é inversamente proporcional à RC. Comparando os valores das Tabelas 9 e 11, observa-se que quanto maior a capacidade de o corpo absorver água, menor a resistência desse corpo em suportar carga, rompendo-se mais facilmente e, conseqüentemente, aumentando a lixiviação dos contaminantes para o meio.

Dos Anjos (2017) obteve percentuais entre 8 e 27% de CAA, quando utilizou cimento Portland para estabilizar e solidificar lodo têxtil. Para o maior percentual de lodo usado (20%) e tempo de cura fixo (28 dias), ocorreu o maior percentual de absorção de água. O autor concluiu, portanto, que a incorporação do lodo têxtil, favorece a retenção de água pela argamassa.

Em seu trabalho, Dias (2015) observou que o tratamento que apresentou menor absorção de água foi o referente a matriz cimentícia que foi incorporada com 5% de borra oleosa de petróleo e 17,5 dias de cura. E em conformidade com a literatura, o mesmo correspondeu ao maior ganho de resistência em relação aos outros tratamentos, com média de 15,85 MPa.

Conforme Lampris *et al.* (2009) a alta porosidade resulta em um aumento da lixiviação dos produtos solidificados. Apesar de terem apresentado um aumento da capacidade de absorção com a incorporação do resíduo sólido de laboratório todos os tratamentos, apresentaram CAA inferior a 40%, sendo assim, foram aprovados nos critérios para o ensaio de capacidade de absorção de água.

A Tabela 12 apresenta a análise estatística para os dados obtidos durante o ensaio de capacidade de absorção de água.

Tabela 12: Avaliação estatística dos dados para a CAA.

| Fontes de Variação | G. L | Soma do Quadrado (SQ) | Quadrado Médio (QM) | Valor F (QMR/QME) | Valor P |
|----------------------|------|-----------------------|---------------------|-------------------|---------|
| Regressão | 1 | 1,5165 | 1,5165 | 53,06 | 0,000 |
| Erro Residual | 10 | 0,2858 | 0,0286 | | |
| Curvatura | 1 | 0,0182 | | | 0,454 |
| Total | 12 | 1,8205 | | | |
| $R^2 = 82,6\%$ | | $R^2_{\max} = 84,1\%$ | | | |

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

De acordo com a Tabela 12, observa-se que a ANOVA apresentou valor de P igual a 0,000 que é menor do que o nível de significância adotado (0,05). Com isto pode-se afirmar, então, com 95% de confiança, que as médias dos tratamentos (10, 30 e 45% de RSL) são diferentes entre si.

Observa-se que o valor de F calculado (53,06) foi maior do que o F tabelado (4,96). Deste modo, rejeita-se a hipótese nula (H_0) e o fator percentagem de resíduo sólido influenciou na variável resposta (CAA).

Ainda de acordo com a Tabela 12, o valor do coeficiente de determinação (R^2) foi igual a 82,6%, isto significa que 82,6% dos dados são explicados pelo modelo. A percentagem máxima explicável (R^2_{\max}) foi de 84,1%. Os 15,9% restantes não podem ser explicados pelo modelo, são erros atribuídos à aleatoriedade do experimento.

A partir da ANOVA pode-se obter o modelo para a regressão conforme a equação 12:

$$\hat{Y}_{CAA}(\%) = 6,956 - 0,02037\%RSL \quad (12)$$

O modelo acima conseguiu explicar em nível máximo 84,1% dos dados para a capacidade de absorção de água. Para o teste de curvatura, observa-se que o valor de P (0,454) é maior que 0,05. Então não há curvatura e o modelo a ser adotado foi o linear, pois, é foi o que proporcionou melhor ajuste dos dados.

4.3.3 Umidificação e Secagem

O ensaio de U/S é um parâmetro importante para verificar a durabilidade das matrizes cimentícias quando submetidas a mudanças de temperatura.

A Tabela 13 apresenta os resultados referentes aos corpos de prova preparados com 10, 30 e 45% de RSL e tempo de cura fixo de 28 dias para os ensaios de Umidificação e Secagem.

Tabela 13: Resultados do Ensaio de U/S para os corpos de prova preparados.

| Tratamento | Fator A % RSL | Variável Resposta U/S (%) |
|-------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| 01 | 10% | 1,37 |
| 02 | 10% | 1,48 |
| 03 | 10% | 1,49 |
| 04 | 30% | 1,52 |
| 05 | 30% | 1,53 |
| 06 | 30% | 1,54 |
| 07 | 45% | 1,57 |
| 08 | 45% | 1,68 |
| 09 | 45% | 2,05 |

Nota: %RSL: porcentagem de Resíduo Sólido de Laboratório; U/S: Umidificação/ Secagem.

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Brito (2007), aborda que o ensaio de U/S permite avaliar a capacidade que o material E/S tem em resistir as variações de mudanças de estado, através da passagem por sucessivos ciclos de umidificação do material com água ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) e secagem a ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) em estufa. De acordo com Brito (2007), para ser aprovado no ensaio de U/S, a perda em peso do material não deve ser superior a 15% em relação ao seu peso inicial, após seis ciclos de umidificação e secagem.

Observar-se através da Tabela 13 que, aumentando-se a quantidade de resíduo sólido de laboratório foram obtidas porcentagens superiores para U/S. Apesar disto, os corpos de prova preparados foram aprovados no presente ensaio, apresentando perda de peso inferior a 15% após os períodos de umidificação/secagem.

Comportamento semelhante para o ensaio de umidificação e secagem foi obtido com Guimarães (2017), onde se constatou que à medida que aumentava a porcentagem de lodo de curtume nos tratamentos aumentava também a porcentagem de umidificação e secagem, independente dos tempos de cura. Ao utilizar nas matrizes cimentícias 25% de lodo, os resultados de perda de massa foram aumentando quando comparado aos resultados obtidos com 5% de lodo, neste caso apresentaram uma menor perda de massa.

A Tabela 14 apresenta a análise estatística para a Umidificação/Secagem.

Tabela 14: Avaliação estatística dos dados para a U/S.

| Fontes de Variação | G. L | Soma do Quadrado (SQ) | Quadrado Médio (QM) | Valor F (QMR/QME) | Valor P |
|----------------------|------|-----------------------------|---------------------|-------------------|---------|
| Regressão | 2 | 1,3376 | 0,6688 | 37,02 | 0,000 |
| Erro Residual | 9 | 0,1626 | 0,0181 | | |
| Curvatura | 1 | 0,1149 | 0,1149 | | 0,033 |
| Total | 12 | 1,6115 | | | |
| $R^2 = 86,8\%$ | | $R^2_{\text{max}} = 89,2\%$ | | | |

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Através da Tabela 14, observa-se que a ANOVA apresentou valor de P igual a 0,000 que é menor do que o nível de significância adotado (0,05). Com isto pode-se afirmar, então, com 95% de confiança, que as médias dos tratamentos (10, 30 e 45% de RSL) são diferentes entre si.

Observa-se que o valor de F calculado (37,02) foi maior do que o F tabelado (4,26). Deste modo, rejeita-se a hipótese nula (H_0) e o fator porcentagem de resíduo sólido influenciou na variável resposta (U/S).

Ainda de acordo com a Tabela 14, o valor do coeficiente de determinação (R^2) foi igual a 86,8%, isto significa que 86,8% dos dados são explicados pelo modelo. A porcentagem máxima explicável (R^2_{max}) foi de 89,2%. Os 10,8% restantes não podem ser explicados pelo modelo, são erros atribuídos à aleatoriedade do experimento.

A partir da ANOVA pode-se obter o modelo para a regressão conforme a equação 13:

$$\hat{Y}_{U/S}(\%) = 1,470 - 0,003395\%RSL - 0,000482\%RSL^2 \quad (13)$$

O modelo acima conseguiu explicar em nível máximo 89,2% dos dados para a umidificação/secagem. Para o teste de curvatura, observa-se que o valor de P (0,033) é menor que 0,05. Então há curvatura e o modelo a ser adotado deve ser o quadrático, pois, é o que proporcionou melhor ajuste dos dados.

4.4 Imobilização dos Contaminantes

Para avaliar a imobilização dos contaminantes presentes no RSL foram realizados os ensaios de lixiviação e solubilização, para a partir destes determinar o teor dos metais pesados cádmio e níquel presentes nos extratos lixiviados e solubilizados, respectivamente. A Tabela 15 apresenta o resumo dos Limites Máximos Permissíveis (LMP) dos metais pesados avaliados nesta pesquisa, níquel e cádmio.

Tabela 15: Valores dos LMP para o cádmio e o níquel.

| PARÂMETROS | LIXIVIAÇÃO | | SOLUBILIZAÇÃO | |
|----------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| | (mg.L ⁻¹) | (mg.kg ⁻¹) | (mg.L ⁻¹) | (mg.kg ⁻¹) |
| Cádmio ¹ | 0,50 | 10,00 | 0,005 | 0,03 |
| Níquel ³ | 0,02 | 0,40 | 0,020 | 0,08 |

Nota: ¹ Parâmetros e limites máximos no extrato lixiviado e solubilizado conforme recomendação da ABNT NBR 10004 (2004). ³ Valores sugeridos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) - Portaria N0 195 de 2005 (CETESB, 2005).

4.4.1 Análise da Lixiviação

Para a avaliar a imobilização dos contaminantes foi utilizado o ensaio de lixiviação. Os dados obtidos foram comparados com os requisitos fixados pela ABNT NBR 10.005 (2004) e pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) exigidos para a obtenção do extrato lixiviado do resíduo sólido de laboratório. Na Tabela 16 encontram-se os valores para as concentrações de cada metal, obtidas a partir do extrato lixiviado do material tratado, expressos em mg.L⁻¹.

Tabela 16: Quantificação dos metais cádmio e níquel presentes no extrato lixiviado.

| Experimento | Fator % RSL | Variável Resposta Cádmio (mg.L⁻¹) | Variável Resposta Níquel (mg.L⁻¹) |
|--------------------|------------------------------|---|---|
| 01 | 10% | 0,013 | 0,170 |
| 02 | 10% | 0,014 | 0,150 |
| 03 | 10% | 0,016 | 0,150 |
| 04 | 30% | 0,050 | 0,110 |
| 05 | 30% | 0,050 | 0,140 |
| 06 | 30% | 0,050 | 0,130 |
| 07 | 45% | 0,050 | 0,100 |
| 08 | 45% | 0,050 | 0,050 |
| 09 | 45% | 0,050 | 0,050 |

Nota: %RSL: Porcentagem de resíduo sólido de laboratório.

Fonte: Dados da Pesquisa, 2018.

A partir da Tabela 16 observa-se que ao aumentar a porcentagem de RSL a concentração do metal pesado cádmio presente no extrato lixiviado foi maior. Comportamento semelhante foi observado por Bandeira (2010) onde a maior concentração de metais no extrato lixiviado foi de 13,9 mg/L para corpos de prova preparados com 20% de borra oleosa de petróleo, e a menor concentração obtida foi de 6,4 mg/L na presença de 10% de resíduo.

Conforme a Tabela 16 todos os tratamentos realizados apresentaram concentração do metal pesado cádmio inferior ao limite máximo permissível (0,5 mg/L) recomendado pela ABNT NBR 10.004 (2004), indicando que houve tratamento eficaz no que diz respeito a imobilização do cádmio presente no resíduo. Com relação ao metal pesado níquel todos os experimentos apresentaram concentração de níquel no extrato lixiviado acima do limite máximo permissível de 0,02 mg/L., no entanto, houve uma redução considerável deste metal, comparando com o resultado da lixiviação dos metais na sua forma bruta, que antes do processo de E/S era de 193 mg/L para o níquel.

Como a concentração do níquel presente no extrato lixiviado foi superior aos limites máximos permissíveis sugeridos pela CETESB, as matrizes cimentíceas obtidas foram reprovadas no critério de imobilização dos contaminantes, sendo classificadas como pertencentes a Classe I – Perigosos.

No entanto, observa-se que houve redução expressiva nas concentrações de níquel e cádmio comparando-se com os valores obtidos para o resíduo sólido de laboratório bruto, sem tratamento, que eram de 193 mg/L e 109 mg/L, respectivamente.

Diante disto, torna-se irrelevante avaliar a solubilização do material obtido, pois o objetivo da solubilização consiste em verificar se o material classificado como Classe II - Não Perigosos pertence a classe II A (não inertes) ou classe II B (inertes). A Tabela 17 apresenta a análise estatística para a Lixiviação do cádmio.

Tabela 17: Avaliação estatística para a Lixiviação do cádmio.

| Fontes de Variação | G. L | Soma do Quadrado (SQ) | Quadrado Médio (QM) | Valor F (QMR/QME) | Valor P |
|------------------------------|------|---------------------------------|---------------------|-------------------|---------|
| Regressão | 1 | 0,0949 | 0,0949 | 55,08 | 0,000 |
| Erro Residual | 10 | 0,0172 | 0,0017 | | |
| Curvatura | 1 | | | | 0,296 |
| Total | 12 | 0,1121 | | | |
| R² = 83,1% | | R²max = 84,6% | | | |

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Através da Tabela 17, observa-se que a ANOVA apresentou valor de P igual a 0,000 que é menor do que o nível de significância adotado (0,05). Com isto pode-se afirmar, então, com 95% de confiança, que as médias dos tratamentos (10, 30 e 45% de RSL) são diferentes entre si.

Observa-se que o valor de F calculado (55,08) foi maior do que o F tabelado (4,96). Deste modo, rejeita-se a hipótese nula (H0) e o fator percentagem de resíduo sólido influenciou na lixiviação do metal pesado cádmio.

Ainda de acordo com a Tabela 14, o valor do coeficiente de determinação (R²) foi igual a 83,1%, isto significa que 83,1% dos dados são explicados pelo modelo. A percentagem máxima explicável (R²max) foi de 84,6%. Os 15,4% restantes não podem ser explicados pelo modelo, são erros atribuídos à aleatoriedade do experimento.

A partir da ANOVA pode-se obter o modelo para a regressão conforme a equação 14:

$$\hat{Y}(mg/kg) = 0,3032 + 0,005094\%RSL \quad (14)$$

O modelo acima conseguiu explicar em nível máximo 84,6% dos dados para a lixiviação do cádmio. Para o teste de curvatura, observa-se que o valor de P (0,296) é maior do que 0,05. Então não há curvatura e o modelo a ser adotado deve ser o linear, pois, é o que proporcionou melhor ajuste dos dados. A Tabela 18 apresenta a análise estatística para a Lixiviação do níquel.

Tabela 18: Avaliação estatística para a Lixiviação do níquel.

| Fontes de Variação | G. L | Soma do Quadrado (SQ) | Quadrado Médio (QM) | Valor F (QMR/QME) | Valor P |
|------------------------|------|----------------------------|---------------------|-------------------|---------|
| Regressão | 2 | 16,6934 | 8,3467 | 162,15 | 0,000 |
| Erro Residual | 9 | 0,4633 | 0,0514 | | - |
| Curvatura | 1 | 3,9032 | | | 0,000 |
| Total | 12 | 21,0599 | | | |
| R ² = 96,7% | | R ² max = 97,3% | | | |

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Através da Tabela 18, observa-se que a ANOVA apresentou valor de P igual a 0,000 que é menor do que o nível de significância adotado (0,05). Com isto pode-se afirmar, então, com 95% de confiança, que as médias dos tratamentos (10, 30 e 45% de RSL) são diferentes entre si. Observa-se que o valor de F calculado (162,15) foi maior do que o F tabelado (4,26). Deste modo, rejeitam-se as hipóteses nulas (H₀) e o fator percentagem de resíduo sólido influenciou na lixiviação do metal pesado níquel.

Ainda de acordo com a Tabela 18, o valor do coeficiente de determinação (R²) foi igual a 96,7%, isto significa que 96,7% dos dados são explicados pelo modelo. A percentagem máxima explicável (R²max) foi de 97,3%. Os 2,7% restantes não podem ser explicados pelo modelo, são erros atribuídos à aleatoriedade do experimento.

A partir da ANOVA pode-se obter o modelo para a regressão conforme a Equação 15:

$$\hat{Y}(mg/kg) = 2,912 + 0,06722\%RSL - 0,002808\%RSL^2 \quad (15)$$

O modelo acima conseguiu explicar em nível máximo 97,3% dos dados para a lixiviação do níquel. Para o teste de curvatura, observa-se que o valor de P (0,000) é menor que 0,05. Então há curvatura e o modelo a ser adotado deve ser o quadrático, pois, é o que proporcionou melhor ajuste dos dados.

4.5 Balanço de Massa e Eficiência do processo de E/S

A eficiência de retenção dos metais pesados cádmio e níquel foi calculada a partir da equação 9, em função das composições das massas de resíduo e aglomerante (cimento Portland), além da concentração do lixiviado do material bruto e tratado por E/S. É importante pois funciona como um indicativo de que houve tratamento e não a diluição do resíduo sólido na massa aglomerante (BRITO, 2007). O balanço de massa, por sua vez, foi calculado em função das massas bruta, tratada e retida para verificar a estabilidade dos contaminantes existentes nas matrizes cimentícias além de avaliar a composição química das matrizes solidificadas.

Na Tabela 19, encontram-se os valores médios das massas do processo de E/S das matrizes cimentícias de todos os tratamentos em relação ao cádmio presente no extrato lixiviado para obter o balanço de massa e eficiência do processo.

Tabela 19: Balanço de massa e eficiência do processo de E/S no extrato lixiviado do Cádmio.

| Tratamento | %RS L | Massa do Contam. Bruto¹ (g) | Massa do Contam. Tratado² (g) | Massa do Contam. Retido³ (g) | Eficiência de Transformação (%) |
|-------------------|------------------|---|---|--|--|
| T1 | 10 | 212,63 | 1,97 | 210,66 | 99,97 |
| T2 | 10 | 212,63 | 2,55 | 210,08 | 99,97 |
| T3 | 10 | 212,63 | 2,56 | 210,07 | 99,97 |
| T4 | 30 | 212,63 | 2,74 | 209,89 | 99,97 |
| T5 | 30 | 212,63 | 2,94 | 209,69 | 99,96 |
| T6 | 30 | 212,63 | 3,13 | 209,50 | 99,95 |
| T7 | 45 | 212,63 | 3,11 | 209,52 | 99,96 |
| T8 | 45 | 212,63 | 3,14 | 209,49 | 99,98 |
| T9 | 45 | 212,63 | 3,13 | 209,50 | 99,96 |

Nota: ¹Massa do resíduo sólido bruto; ²Massa do contaminante tratado; ³Massa do contaminante retida na matriz; %RSL: porcentagem de resíduo sólido de laboratório.

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Através da Tabela 19 pode-se observar que houve uma diminuição significativa na lixiviação do cádmio após a E/S, comparando-se com o resíduo sólido de laboratório bruto, sem tratamento (212,63 g que corresponde a concentração de 109 mg.L⁻¹). Observou-se ainda que os menores valores de massa lixiviada em relação ao contaminante tratado foram atribuídos às médias do tratamento com 10% de RSL.

O valor igual a 212,63 g de massa de resíduo sólido de laboratório significa a massa de resíduo a ser tratada. Deste total 210,66 g está retida na matriz de cimento e apenas 1,97 g foi lixiviada, ou seja, não está retida na matriz cimentícia. Para este tratamento (T1) a concentração de cádmio foi de 0,013 mg.L⁻¹, valor abaixo do LMP que é 0,5 mg.L⁻¹.

Todos os tratamentos realizados apresentaram pouca variação na eficiência do balanço de massa. No entanto, todos eles apresentaram eficiência de retenção média de aproximadamente 99,96%, indicando que a E/S foi um método eficaz no tratamento de resíduos sólidos de laboratório.

Resultado semelhante foi obtido por Guimarães (2017) ao avaliar a eficiência do processo de Estabilização por Solidificação no tratamento do lodo de curtume, onde obteve eficiência máxima de 96,9% para o tratamento com 5% de lodo. Isso implica dizer que o processo foi satisfatório ao tratar resíduos perigosos.

A Tabela 20 apresenta os valores médios das massas do processo de E/S das matrizes cimentícias de todos os tratamentos em relação ao metal pesado níquel presente no extrato lixiviado para obter o balanço de massa e a eficiência do processo.

Tabela 20: Balanço de massa e eficiência do processo de E/S no extrato lixiviado do Níquel.

| Tratamento | %RSL | Massa do Contam. Bruto¹ (g) | Massa do Contam. Tratado² (g) | Massa do Contam. Retido³ (g) | Eficiência de Transformação (%) |
|-------------------|-------------|---|---|--|--|
| T1 | 10 | 376,50 | 19,75 | 356,75 | 99,88 |
| T2 | 10 | 376,50 | 29,55 | 346,95 | 99,82 |
| T3 | 10 | 376,50 | 29,38 | 347,12 | 99,82 |
| T4 | 10 | 376,50 | 29,38 | 347,12 | 99,82 |
| T5 | 10 | 376,50 | 29,41 | 347,09 | 99,81 |
| T6 | 10 | 376,50 | 29,38 | 347,12 | 99,81 |
| T7 | 10 | 376,50 | 33,06 | 343,44 | 99,79 |
| T8 | 10 | 376,50 | 33,39 | 343,11 | 99,79 |
| T9 | 10 | 376,50 | 33,33 | 343,17 | 99,79 |

Nota: ¹Massa do resíduo sólido bruto; ²Massa do contaminante tratado; ³Massa do contaminante retida na matriz; %RSL: porcentagem de resíduo sólido de laboratório.

Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

De acordo com a Tabela 20 observa-se que as médias dos tratamentos (T7, T8, e T9), por apresentarem maior porcentagem de RSL foram os que apresentaram menor massa de contaminante retida nas matrizes cimentícias em relação as concentrações de níquel no extrato lixiviado, e, conseqüentemente apresentaram menor eficiência do processo de E/S. Pode-se concluir que a medida em que a quantidade de resíduo aumentou a capacidade de retenção do metal diminuiu.

Comportamento semelhante foi obtido por Bandeira (2015) ao estudar a eficiência da Estabilização por Solidificação no tratamento da Borra Oleosa de Petróleo (BOP), onde constatou que a maior eficiência obtida foi para o tratamento com a menor porcentagem da borra (10% de BOP) e que eficiências menores foram obtidas ao se aumentar o percentual de resíduo.

Todos os tratamentos realizados para as diferentes porcentagens de Resíduo Sólido de Laboratório (10, 30 e 45% de RSL) apresentaram concentrações de níquel superiores aos Limites Máximos Permissíveis que é de $0,02 \text{ mg.L}^{-1}$. No entanto, observou-se que houve redução bastante significativa na massa de níquel presente no material após o processo de E/S de 376,50 g para uma média de 29,62 g.

O valor atenuado pode ser considerado satisfatório, pois, o níquel é um metal altamente perigoso e a sua atenuação é fator decisivo para disposição e gerenciamento adequado.

4.6 Rotas de Destinação do RSL

A partir dos resultados para os critérios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes, o Protocolo de avaliações proposto por Brito (2007) propõe várias rotas de destinação e/ou disposição dos materiais E/S.

O material obtido apresentou todos os resultados dentro dos limites permissíveis para os ensaios de Resistência à Compressão, Capacidade de Absorção de Água e Umidificação/Secagem, sendo portanto aprovado nos critérios de Integridade e Durabilidade para o material E/S.

Os resultados para os ensaios de lixiviação apresentaram valores abaixo dos limites máximos permissíveis recomendados para o metal pesado Cádmio. Em contrapartida, os resultados para os ensaios de lixiviação apresentaram valores acima dos limites máximos permissíveis recomendados para as concentrações de níquel, o que indica que o material obtido foi reprovado quanto ao critério de Imobilização dos Contaminantes.

A Tabela 21 apresenta a classificação dos materiais E/S com base nos resultados para os ensaios de Resistência à Compressão, Capacidade de Absorção de Água, Umidificação/Secagem e Lixiviação dos contaminantes Cádmio e Níquel a partir da análise do teor de metais pesados presentes nos extratos lixiviados das matrizes cimentícias.

Tabela 21: Classificação dos Materiais E/S.

| %RSL | RC | CAA | U/S | Lixiviação Cd | Lixiviação Ni | Classe |
|-------------|-----------|------------|------------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| 10% | Aprovado | Aprovado | Aprovado | Aprovado | Reprovado | Classe I |
| 30% | Aprovado | Aprovado | Aprovado | Aprovado | Reprovado | Classe I |
| 45% | Aprovado | Aprovado | Aprovado | Aprovado | Reprovado | Classe I |

Nota: RC: resistência a compressão; CAA: Capacidade de absorção de água; U/S: Umidificação e secagem; Classe I (Perigoso: ABNT NBR 10004/2004a);
Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

De acordo com os resultados para os testes de Integridade e Durabilidade e Imobilização dos Contaminantes apresentados na tabela 21 foi possível definir uma rota de destinação para o material E/S. O fluxograma 2 apresenta as rotas para as matrizes cimentícias incorporadas com 10%, 30% e 45% de resíduo sólido de laboratório conforme recomendação de Brito (2007).

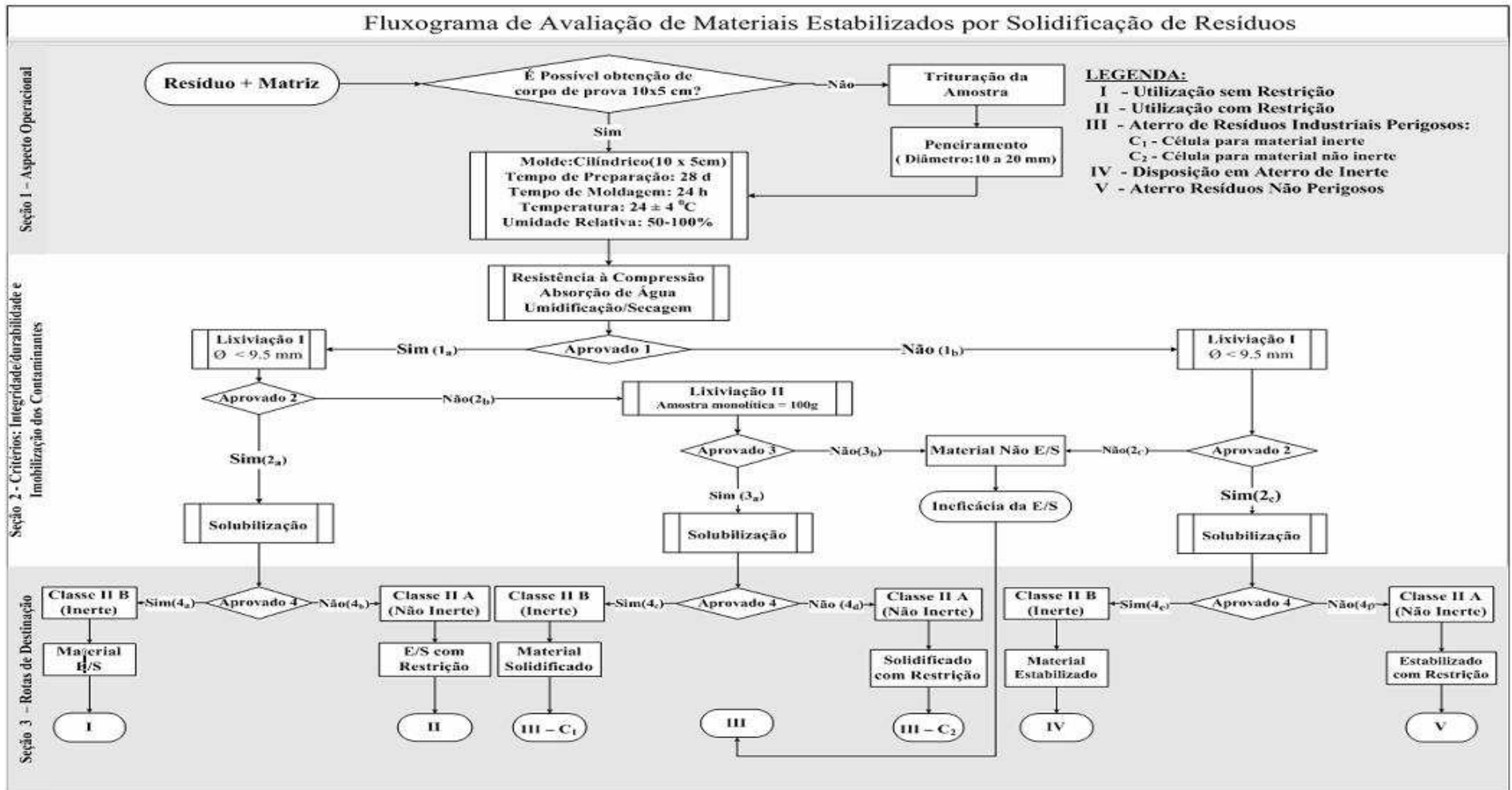
Diante do Fluxograma 2 concluiu-se que o material obtido deve ser encaminhado para a disposição em aterros específicos para Resíduos Perigosos, tendo em vista que foi reprovado nos ensaios de lixiviação conforme o Protocolo de Avaliação de Materiais E/S proposto por Brito (2007).

A norma NBR 10.157 regulamenta a disposição de resíduos perigosos e com características tóxicas em células especiais de disposição com o objetivo de proteger as áreas localizadas próximas à disposição de materiais que apresentem características contaminantes (ABNT, 1987).

Segundo BarthH *et al.* (1989) os objetivos da E/S consiste em melhorar o manuseio e as características iniciais do resíduo, além de reduzir a massa do contaminante no material final obtido. Nesta pesquisa, a redução (comparada às suas concentrações no resíduo bruto) na concentração de ambos os metais avaliados, cádmio e níquel, confirma que eles sofreram algum mecanismo de imobilização efetivo na matriz de cimento, apesar

de alguns dos tratamentos realizados ainda apresentarem concentrações dos metais superiores aos Limites Máximos Permissíveis recomendados.

Fluxograma 2: Rotas para a destinação dos materiais Estabilizados por Solidificação.



Fonte:

BRITO,

2007.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho de dissertação teve como proposta realizar o tratamento do resíduo sólido de laboratório, contendo os metais pesados Cádmio e Níquel, visando obter um material com propriedades químicas melhoradas através do processo de Estabilização por Solidificação. Desta forma, realizou-se a avaliação do resíduo sólido de laboratório quando incorporado nas matrizes cimentícias sob os critérios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes. Com isto, pode-se concluir que:

- O Resíduo Sólido de Laboratório avaliado foi classificado como pertencente a Classe I - Perigoso, tendo em vista que as concentrações de Cádmio (109mg/L) e Níquel (193mg/L) apresentaram concentrações superiores aos limites máximos permissíveis estipulados, indicando que o resíduo precisa ser tratado para reduzir sua toxicidade e periculosidade.
- Todos os tratamentos aplicados ao RSL foram aprovados quanto ao critério de integridade/durabilidade. Isto indica que o material obtido apresenta baixa porosidade, favorecendo o controle da lixiviação dos contaminantes para o meio, além de apresentar pequena perda de peso ao passarem por diferentes variações de estado, indicando que o material tende a apresentar boa durabilidade a longo prazo.
- O resíduo sólido de laboratório foi reprovado quanto ao critério de imobilização dos contaminantes, tendo em vista que a concentração de níquel para todos os tratamentos permaneceu acima dos limites máximos permissíveis estipulados, mantendo o resíduo pertencente a Classe I- Perigoso. Dessa forma, o material obtido deve ser encaminhado a aterros específicos para abrigar resíduos perigosos.
- Os modelos obtidos por meio da análise estatística dos dados foram significativos para os ensaios de Resistência à Compressão, Capacidade de Absorção de Água, Umidificação/Secagem e Lixiviação para ambos os metais

avaliados, Cádmiu e o Níquel. Isto significa que o fator adotado (%RSL) influenciou significativamente nas variáveis respostas estudadas.

- Através da eficiência de retenção constatou-se que a estabilização por solidificação é um processo eficaz no tratamento do resíduo sólido de laboratório, obtendo eficiências superiores a 98% em todos os tratamentos avaliados.
- O balanço de massa realizado mostrou que apesar do resíduo permanecer na Classe I (Perigosos) houve atenuação significativa nas quantidades de ambos os metais avaliados após o processo de E/S quando comparado às suas massas antes do tratamento, indicando que na disposição dos materiais E/S, uma quantidade menor dos contaminantes poderá causar menor impacto ambiental.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade da pesquisa, sugere-se:

1. Realizar a avaliação ambiental dos contaminantes avaliando outros fatores além da porcentagem de Resíduo Sólido de Laboratório, como tempo de cura e temperatura;
2. Avaliar as mesmas porcentagens deste resíduo utilizadas nesta pesquisa porém com outro tipo de areia, brita e cimento para verificar se a quantidade de contaminantes presente nestes aglomerantes influenciou nas concentrações de níquel obtidas nos extratos lixiviados que permaneceram acima do Limite Máximo Permissível;
3. Estudar a cinética de decaimento da eficiência de retenção em função das porcentagens de resíduo sólido de laboratório utilizadas nos tratamentos realizados.
4. Fazer repetições dos experimentos com teores menores de níquel, ou seja, usar novos experimentos com 2,5%, 5% e 7,5% de resíduo sólido de laboratório para avaliar a eficiência de retenção do Níquel em função de menores quantidades de contaminantes.

REFERÊNCIAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.

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 11578: **Cimento Portland Composto: Especificações,** 1991.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro,2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.157: **Aterro de resíduos perigosos. Critérios para projeto, construção e operação.** ABNT, 1987a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Determinação da Resistência à Compressão do Cimento Portland.** 1ª Ed., 1996.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: **Classificação de Resíduos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.005: **Lixiviação de Resíduos - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.006: **Solubilização de Resíduos - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.

AGUIAR, M.R.M.P.; NOVAES, A.C.; GUARINO, A.W.S. (2002). **Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos.** *Química Nova*, v. 25, n. 6, p.1145-1154.

ANDRADE, M.S.A.; BRITO, A.L.F.; MUNIZ, A.C.F. **Tratamento da Borra Oleosa de Petróleo e Estudo Cinético do Processo de Estabilização por Solidificação.***Revista Brasileira de Ciências Ambientais* – Número 31 – Março de 2014.

AQUIM, P. M. **Gestão em Curtumes: Uso Integrado e Eficiente da Água.** 2009. 159f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - Paraíba.

BACCAN, N.; ANDRADE, J.; GODINHO, O.; BARONE, J. **Química Analítica Quantitativa Elementar.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2001, 259 p.

BANDEIRA, A. A. S.; BRITO, A. L. F.; OLIVEIRA, M. J. **Avaliação da eficiência de retenção de contaminantes em material estabilizado e solidificado usando como indicativo o teor de óleos e graxas.** In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 33., 2012, Salvador. Anais... Salvador: ABES, 2012.

BANDEIRA, A.A.S. **Atenuação de hidrocarbonetos totais de petróleo e óleo presentes em borra de petróleo usando aglomerante à base de cimento e argila organofílica.** 2010.83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Paraíba.

BARTH, E; PERCIN, P; AROZARENA, M; ZIELEINSWKI, J; DOSANI, M; MAXEY, H; HOKANSON, S.A; PRYATELY, C; WHIPPLE, T; KRAVITZ, R; CULLINANE,M; JONE, L; MALONE, P. **Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes,** Noyes Data Corporation, Cincinnati, USA, 1989,399p.

BREHN, F. A. et al. **Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 15-27, abr./jun. 2013.

BRITO, A.L.F.; SOARES, S. R. **Avaliação da integridade e da retenção de metais pesados em materiais estabilizados por solidificação.** Eng. Sanit. Ambient. v.14, p. 39-48, 2009.

BRITO, A. L. F. de **Codisposição de Resíduos Sólidos Urbanos e Resíduos Sólidos de Indústria de Curtume.** Campina Grande: UFPB/UEPB, 1999.

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.

BROCKER, D.M.; BREHM, F.A.; KULAKOWSKI, M.P.; MORAES, C.A.M. **Produção e avaliação em escala industrial de blocos cerâmicos contendo 2,5% de lodo de fosfatização.** Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. UTFPR. Rebouças. Curitiba. Brasil. 2017.

CARRAPATOSO G, LOUREIRO, C. **Dermatite endógena induzida pela ingestão de níquel: a propósito de dois casos clínicos.** Rev Port Imunoalergol. 2004; 12 (3):261-70.

CASTRO, S.V. **Efeitos de metais pesados presentes na água sobre a estrutura das comunidades bentônicas do alto Rio das Velhas – MG.** 2006. 110f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG.

CASTRO, T. M. **Solidificação/Estabilização de Lodo Gerado no Tratamento de Efluente de Lavanderia Industrial Têxtil em Blocos Cerâmicos Acústicos e Seu Desempenho em Câmara Reverberante.** 86 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Maringá. Maringá.

CHEN, M.; LI, X.; YANG, Q.; ZENG, G.; ZHANG, Y.;LIAO, D.; LIU, HU, J.; GUO, L. **Total concentrations and speciation of heavy metals in municipal sludge from Changsha, Zhuzhou and Xiangtan in middle-south region of China.** Journal of Hazardous Materials, 160:324– 329, 2008.

COLACIOPPO, Sérgio; **Higiene e Toxicologia Ocupacional - Metais Pesados;** Universidade de São Paulo; Brasil; 2001.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - DECISÃO DE DIRETORIA Nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005.

CONNER,J.R; HOFFNER, S.L. **A Critical Of Stabilization/Solidification Technology.** Crit. Environ. Sci. Technol. v.28, n.4, p.397- 462, 1998.

CONAMA- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE –Resolução nº 20, de junho de 1986.

DIAS, N.M.P.; ALLEONI, L.R.F.; CASAGRANDE, J.C.; CAMARGO, O. A. Isotermas de adsorção de cádmio em solos ácidos. **Rev. bras. eng. agríc. ambient..** V.5. N.2. A.2001.São Paulo, SP.

DIAS, Joelma. **Otimização e limites de avaliação ambiental de materiais estabilizados por solidificação após a incorporação de borra oleosa de petróleo.** 2015. 185f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - Paraíba.

DIAS, S. M. F. VAZ, L. M.S., CAMPOS, Aurea C. A. **Gestão de Resíduos Sólidos para Sociedades Sustentáveis Estadual de Feira de Santana (BA): história, desafios e perspectivas.** De Conto, Suzana M., Gestão de resíduos em Universidades. Caxias do Sul-RS, EDUCS – Editora da Universidade de Caxias do Sul, 2010, p 319.

Dos ANJOS, D.C. **Estudo sobre a influência do lodo têxtil gerado por uma lavanderia industrial, aplicado em argamassa de cimento Portland compost de Fíler.** 2017. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Joinville. Joinville - Santa Catarina.

DYER, J. C.; MIGNONE, N. A. **Handbook of Industrial Residues.** New Jersey: Noyes Data Corporation, 1983.(Environmental Engineering Series).

FERREIRA, A. P.; HORTA, M.A.P; da CUNHA, C.L.N. **Avaliação das concentrações de metais pesados no sedimento, na água e nos órgãos de Nycticorax nycticorax (Garça-da-noite) na Baía de Sepetiba, RJ, Brasil.** *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 10 (2), p.1-13, Junho, 2010.

FRANCO, C.C.; CASTRO, M. M.; WALTER, M. E.; **Estudo das cascas de banana das variedades prata, caturra e maçã na biossorção de metais pesados gerados pelos efluentes dos laboratórios do centro universitário de belo horizonte.** e-xacta, Belo Horizonte, v. 8, n. 1, p. 99-115. (2015). Editora UNIBH.

GERBASE, A.E; COELHO, F.S; MACHADO, P.F.L; FERREIRA V.F. **Gerenciamentos de Resíduos Químicos em Instituições de Ensino e Pesquisa.** *Revista Quim. Nova*, Vol. 28, No. 1, 3, 2005.

GUIMARÃES, D. L. **Tratamento de Lodo Primário de Estação de Tratamento de Efluente e Aplicação de Protocolo de Avaliação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2008.

GUIMARÃES, A. V.A. **Cinética dos Contaminantes do Lodo de Curtume e Otimização do Tratamento de Estabilização por Solidificação.** 2017. 187f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - Paraíba.

GUIMARÃES, A. V. A. **Diagnóstico do Risco do Lodo de Curtume “in natura” para Exposição no Meio Ambiente e Viabilidade do Processo de Estabilização por Solidificação Visando Utilização na Construção Civil.** In 2º Congresso de Pesquisa. 2014.

GUISARD, Cármen Luiza Martins Pães; **A Vigilância Ambiental em Saúde Sobre o Uso Agrotóxico em um Município do Vale de Paraíba;** Universidade de Taubaté; Taubaté; Brasil; 2006;

GONZALEZ, Karina Regina. **Toxicologia do Níquel.** *Revista Intertox de Toxicologia Risco Ambiental e Sociedade*, v. 9, n. 2, p. 30-54, jun. 2016.

HEREK, L.C.S; BERGAMASCO, R; TAVARES, C.R.G; UMBRA, V.O; PANCOTTE, L.P. **Estudos da solidificação/estabilização do lodo da indústria textil em material cermico.** *Ceramica Industrial*. v.10, p.41-46, 2005.

IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. **Nickel and nickel compounds.** In: A review of human carcinogens. Part C: Arsenic, metals, fibres, and dusts. Lyon, France: IARC, 2012, pp. 169-2018.

IMBROISI, D.; SANTOS, A. J. M. G.; BARBOSA, S. S.; SHINTAKU, S. F.; MONTEIRO, H. J.; PONCE, G. A. E. P.; FURTADO, C. J. T.; MELLO, D. C. **Gestão**

de Resíduos Químicos em Universidades: Universidade de Brasília em Foco. Química Nova, São Paulo, v. 29, n. 2, p.404-409,2006.

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.

JOCHEN, L.F. **Efeito do agregado reciclado dos resíduos de construção e demolição na retenção dos metais pesados em processos de solidificação e estabilização.** Tese de doutorado. 299p. Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. SC. 2017.

KLAASEN, Curtis D.; **Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons;** Sixth Edition; McGraw-Hill; 812-837; USA; 2001;

KLAASSEN, Curtis D.; **Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons;** Fifth Edition; McGraw-Hill; 91-109; 691-696; 699-712; USA; 1996;

KRAEMER, Maria Elisabeth Pereira. **Resíduos Industriais e a Questão Ambiental.** II Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – SEGeT'2005.

KRAPF, R. S.; FERREIRA, J.Z. **Avaliação da eficiência do processo de eletrodialise no tratamento de efluentes de níquel.** XXVI Salão de Iniciação Científica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – SIC, UFRGS. 2014. Porto Alegre.

LAMPRIS, C.; STEGEMANN, J.A.; CHEESEMAN. C.R. **Solidification/Stabilisation of air pollution control residues using Portland cement: Physical properties and chloride leaching.** Waste Management, v.29, p.1067–1075, 2009.

LEAL, D.G. **Tratamento de lodo primário de estação de tratamento de efluentes e aplicação de protocolo de avaliação.** 2008. 86f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.

LEITE, C.B.B. **Aspectos metodológicos no estudo e caracterização de contaminação de solo e água.** In: WORKSHOP SOBRE ÁREAS CONTAMINADAS. São Paulo, 1997. Resumos Expandidos. CETESB/GTZ/USP, p. 35 – 6.

LIMA, T. F. de M. **Modelagem e Simulação de Sistemas Ambientais utilizando o TerraME.** Chapter 2- 2010. p. 26.

LIMA, A.; MATIAS, A.; SOBRINHO, I. **Produção dos resíduos químicos nos laboratórios do instituto multidisciplinar em saúde da Universidade Federal da Bahia (IMS/UFBA) no período de 2011 à 2014.** REPOSITÓRIO *Institucional*. UFBA. 2016.

https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/19232?mode=full&submit_simple=Mostrar+registro+completo+do+item

LOZOVEY, L.R. **Diagnóstico do sistema de gerenciamento dos resíduos de construção e demolição (RCD) no município de Florianópolis e seu enquadramento no cenário atual.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Florianópolis, SC.

MARTINS, D.F.Q.L. **Efeitos do cádmio e chumbo na saúde humana.** Dissertação de mestrado. Departamento de Ciências Farmacêuticas. Faculdade de Ciências da Saúde. 2016. Disponível em <<http://hdl.handle.net/10284/5973>>Acesso: 13/01/18.

MELLO, T.H.C.; SEHNEM, S. **Gestão de resíduos sólidos: Um estudo de caso em central de tratamento de resíduos sólidos industriais.** 4º FÓRUM INTERNACIONAL ECOINNOVAR Santa Maria/RS - 26 a 28 de Agosto de 2015.

MINITAB INC. STATISTICAL SOFTWARE–Data Analysis Software. Version 17, 2017.

MORAES, D.S.L.; JORDAO, B.Q. 2002. **Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana.** *Revista de Saúde Pública* 36(3): 370-374.

MORAES, A.L.; RODRIGUES, C. F.; RODRIGUES, F. R.; JÚNIOR, R. F. S.; CERA, T.C.; SOUZA, V.B.; ROMANO, L.M.; LIMA, A. A. **Metais pesados e seus impactos.** Anais II Jornada Científica. Centro Universitário Amparense. Dezembro de 2016. p. 18-19. Disponível em <http://www.unifia.edu.br/Acontece/Noticias/2017/027_anais_2016.pdf#page=18>. Acesso: 12/01/2018.

MOREIRA, Deny Cesar; RODRIGUES, Nayara Monteiro. **Determinação do volume de resíduos químicos gerados no Laboratório de Solos da Fundação Universidade Federal do Tocantins.** DESAFIOS, [S.l.], v. 3, n. 1, p. 95-106, nov. 2016. ISSN 2359-3652. Disponível em: <<https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/desafios/article/view/1769>>. Acesso em: 12 jan. 2018. doi: <https://doi.org/10.20873/uft.2359-3652.2016v3n1p95>.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros.** 2ª Ed.; LTC Editora; São Paulo, 2003.

MUÑOZ, A., COSTA, M. (2011). **Elucidating the mechanisms of nickel compound uptake: A review of particulate and nano-nickel endocytosis and toxicity.** *Toxicology Applied and Pharmacology*, 260, 1–16. doi:10.1016/j.taap.2011.12.014

NAIME, R.; GARCIA, A. C.A. **Percepção ambiental e diretrizes para compreender a questão do meio ambiente.** Novo Hamburgo. Feevale, 2004. 136p.

NASCIMENTO, R.M.O.; BRASIL, N.B.; SILVA, P.P.; MUNIZ, A.C.S.; BRITO, A.L.F. **Análise de DQO do lixiviado de resíduos sólidos de laboratório da UFCG após encapsulamento em matriz de cimento.** In: III Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências. Campina Grande. Paraíba. 2018.

NORDBERG, G.F.; FOWLER, B.A.; NORDBERG, M.; FRIBERG, L. (Eds.) **Handbook on the toxicology of metals**, Third Edition. Elsevier Londres, 2007. p.p. 975.

OLIVEIRA, D. M; CASTILHOS JUNIOR, A.B; MIOTELLO, E. **Avaliação da estabilização/solidificação de borras oleosas utilizando caulinita e vermiculita como materiais adsorventes**. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 22., 2003, Joinville. [Anais eletrônicos...]. Joinville: ABES, 2003. CD-ROM.

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, M. J. de; **Tratamento de Resíduos Sólidos Perigosos e Avaliação dos Materiais Estabilizados por Solidificação**. 2012.133f. Dissertação de mestrado em Engenharia química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB,2012.

OLIVEIRA, D. M. **Aplicação da técnica de solubilização/estabilização para resíduos oleosos da indústria petrolífera, utilizando solo argiloso e bentonita**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

OLIVEIRA, M. J. de; **Tratamento de Resíduos Sólidos Perigosos e Avaliação dos Materiais Estabilizados por Solidificação**.2012.133f. Dissertação de mestrado em Engenharia química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB,2012

PABLOS, J.M.; SICHIERI, E.P. **Estudo da reciclagem do resíduo sólido constituído por areias de fundição aglomeradas com argila**. XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ENTAC. Fortaleza, Ceará. 2008.

PEIXE, T. S.. **Avaliação das concentrações de exposição aos metais Pb, Cd, Mn e Ni em fundições de metais não ferrosos e correlações com marcadores de dano oxidativo**. 2010. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Toxicologia e Análises Toxicológicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PHILIPPI JR.,A.(Ed.). **Saneamento, Saúde e Ambiente: Fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Barueri, SP. Manole, 2005. 842p. (Coleção Ambiental, 2).

PINHEIRO, P.P.O; MASSONE, C.G.; CARREIRA, R.S.. **Distribution, sources and toxicity potential of hydrocarbons in harbor sediments: A regional assessment in SE Brazil**. *Marine Pollution Bulletin*. Volume 120, Issues 1–2, 15 July 2017, Pages 6-17.

PINTO FILHO, J. L. de O. **Avaliação Socioeconômica e ambiental da atividade petrolífera na região do Campo Canto do Amaro**. Tese de Doutorado.

Desenvolvimento e Meio Ambiente, Associação em Ampla Rede. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 263f. 2016.

POLASTRI, P.; SCANDELA, A.P.J.; MARTINS, D.C.C.; SILVA, O.H.; CHATALOV, R.C.S. **Tecnologias aplicadas no tratamento e disposição final de resíduos sólidos**. In: 1º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. Gramado. Rio Grande do Sul. 2018.

RAMIREZ, Augusto; Toxicologia del Cádmiu. **Conceptos Actuales para Evaluar Exposición Ambiental u Ocupacional com Indicadores Biológicos**, Anales de la Facultad de Medicina Universidad Nacional Mayor de San Marcos; Vol. 63 (1): 51- 64; 2002;

RAMOS, F. M. S.; KAMINATA, O. T.; TAVARES, C. R. G.; BENATTI, C. T.; CAPELLASSO, M.; INNOCENTI, B. D. **Avaliação da técnica de solidificação/estabilização no tratamento de resíduo têxtil - produção de bloco cerâmico de vedação**. *Cerâmica*, v.55, 2009, p. 408 – 414.

REEVES, Philip G. Chaney, Rufus L; **Bioavailability as an Issue in Risk Assessment and Management of Food Cadmium: A review**; Science of the Total Environment; Vol. 398: 13-19; 2008;

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.

ROCHA, A.F. **“Cádmiu, Chumbo, Mercúriu – A problemática destes metais pesados na Saúde Pública?”**. 2009. 63f. Monografia (Curso de Ciências da Nutrição). Faculdade de Ciências da Nutrição e Alimentação. Universidade do Porto.

ROCHA, C. O.; RAMOS, A. P.; BRITO, A. L. F. **Tratamento de Resíduos Sólido Sintético contendo Metais Pesados através da Estabilização por Solidificação**. In: XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2010, Foz do Iguaçu. XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2010. p. 300.

SERAFINI, R.; CARVALHO, J.P.B.; DE FIGUEIREDO, A.D. **Impactos ambientais e toxológicos da lixiviação em tijolos cerâmicos com adição de resíduos: Uma revisão bibliográfica**. 3º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (3º SPPC), artigo 3SPPC1006, pp. 60 – 71, 2018. DOI: 10.4322/2526-7248.006. 2018.

SASSIOTO, M. L.P; SALVADOR, N. N.B.; CORNETO, E.C. **Gerenciamento de resíduos químicos na Universidade Federal de São Carlos**. In: 3º Encontro Nacional de Segurança Química, Niterói, 1 CDROM, 2005.

SAVAZZI, E. A. **Sugestão de valores de referência de qualidade para os elementos químicos cobalto, estanho, fósforo, lítio, molibdênio, níquel, prata, tálio, titânio e**

vanádio em amostras de água subterrânea coletadas nos Aquíferos Bauru e Guarani, conforme Resolução CONAMA 396. 2013. 135f. Tese (Doutorado). Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto - Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2013.

SCHNEIDER, V.T. **Gerenciamento de resíduos no centro universitário UNIVATES.** 2014. 44f. Monografia. Curso Técnico em Química. Lajeado, RS.

SHI, C.; SPENCE, R. **Designing of cement-based formula for solidification/stabilization of hazardous, radioactive and mixed wastes.** Critical Reviews in Environmental Science and Technology 34, 2005, p. 391-417.

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

SILVA, J. M.; RODRIGUS, A.B.; SAMPAIO, F.S. de O.; OLIVEIRA, E. M. da S.; TORRES, G. R.; BORGES, S. da S.S. **Gerenciamento de resíduos laboratoriais: A experiência do PROGERE - UCE.** Extensão em Ação, Fortaleza, v. 1, n. 8, Jan/Jul. 2015.

SOARES, C.R.F.S.; GRAZZIOTTI, P.H.; SIQUEIRA, J.O.; CARVALHO, J.G. de; MOREIRA, F.M.S. **Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.36, p.339-348, 2001.

SOUSA, L. J. **Remoção de chumbo de efluentes sintético e tratamento do resíduo sólido perigoso gerado utilizando a estabilização por solidificação.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG; Campina Grande – PB; 2009.

SOUZA, R.A; OLIVEIRA, F.Q; OLIVEIRA, E.M. **A importância da gestão de risco em laboratórios de aula prática de instituições de ensino superior.** Revista Brasileira de Ciências da Vida, [S.l.], v. 6, n. Especial, mar. 2018.

STEGMMAN, J. A.; CÔTÉ, P. L. **Summary of an investigation of test methods for solidified waste evaluation.** , Wastes Management. v.10, p.41 – 52, 1990.

TINOCO, J.E.P.; KRAEMER, M.E.P. **Contabilidade E Gestão Ambiental - 3ª Ed.** São Paulo, SP. 2011.

TSUTIYA, M.T. – **Uso agrícola de biossólidos das estações de tratamento de esgotos sanitários.** Revista Saneas, no 09, set. 1998.

VAZ, C. R., IONAMATA, D. O.; STIIRMER, J. C. (2014). **Estado da arte do gerenciamento de resíduos sólidos em instituições de ensino superior: uma revisão**

de literatura. Anais do Congresso de Gestão Ambiental, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

VENTURA, M.; GUEIFÃO, S.; SILVA, R.; DELGADO, I.; COELHO, I.; CASTANHEIRA, I. **Ocorrência de níquel em alimentos consumidos em Portugal: resultados preliminares do projeto-piloto Total Diet Study.** Boletim Epidemiológico Observações. 2016 setembro-dezembro;5(17):10-13. Instituto Nacional de Saúde Doutor Ricardo Jorge, IP. Nov. 2016.

VRIES Gert E. **Plants help clean up toxic soils.** Trends in Plant Science, Volume 5, Issue 9, 1 September 2000. 367p.

YOKEL, RA; **The Speciation of Metals in Mammals Influences their Toxicokinetics and Toxicodynamics and Therefore Human Health Risk Assessment.***Journal of Toxicology and Environmental Health-Part B-Critical Reviews*; Vol. 9 (1): 63-85; January/February; 2006.

WILK, C. M. **Solidification/Stabilization Treatment and Examples of Use at Port Facilities.** ASCE Library, Houston, Texas, EUA, 2004.

ANEXO A

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 $2,88 \pm 0,05$.
- ✓ Pesar 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 ± 2 rpm por 18 ± 2 horas. A temperatura ambiente deve ser mantida a 23 ± 2 °C durante o período de extração;
 - ✓ O tempo de extração é de 18 ± 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 μm .
 - ✓ 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): g

ANEXO B

Ensaio de Solubilização: NBR 10.006 de 2004

I- Material utilizado

a) Vidraria e Equipamentos

- Cápsulas de porcelana
- Béquer de vidro
- Agitadorrotatório de frascos
- Astatas magnéticas
- Medidor de pH com divisões de 0,01 unidades da escala de leitura 174
- 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
- Membrana filtrante de 0,45 μm de porosidade
- Filme de PVC
- Peneira com abertura de 9,5 mm
- Frasco de 1.500 mL.

b) Reagentes

- Amostra a ser analisada
- Água destilada e/ou deionizada, isenta de orgânicos.

II Procedimento

Primeira Etapa

- ✓ Secar a amostra a temperatura até 420°C, utilizando estufa com circulação forçada de ar e

- ✓ determinar a percentagem de umidade.
- ✓ Colocar uma amostra representativa de 250 g (base seca) do resíduo num frasco de 1.500 mL;
- ✓ $m = \text{_____ g}$
- ✓ Adicionar 1000 mL de água destilada, deionizada e isenta de orgânicos, se a amostra foi submetida ao processo de secagem, e agitar em baixa velocidade por 5 minutos, ou fazer o seguinte:
- ✓ $V = 1$ (1:4)
- ✓ Adicionar o volume necessário de água destilada, deionizada e isenta de orgânicos para completar 1.000 mL se a amostra não foi submetida ao processo de secagem e agitar a amostra em baixa velocidade por 5 minutos;
- ✓ Cobrir o frasco com filme de PVC e deixar em repouso por 7 dias, em temperatura até 25C;
- ✓ Término: ()
- ✓ Filtrar a solução com aparelho de filtração guarnecido com membrana filtrante com 0,45 μm de porosidade;
- ✓ Definir o filtrado obtido como sendo o extrato solubilizado;
- ✓ Determinar o pH após a obtenção do extrato solubilizado:
- ✓ pH:.....

Analisar os parâmetros do extrato solubilizado de acordo com o Standard methods for the examination of water and wastewater ou USEPA – SW 846 – Test methods for evaluating solid waste: Physical/Chemical methods.