



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA - PPGEQ

LAEDSON ENEAS CAVALCANTE

TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE LABORATÓRIO UTILIZANDO A  
TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO

Campina Grande - Paraíba

Março de 2021

LAEDSON ENEAS CAVALCANTE

TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE LABORATÓRIO UTILIZANDO A  
TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (PPGEQ/CCT/UFCG), como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

**Orientador:** André Luiz Fiquene de Brito, *Dr.*

Campina Grande – PB

Março de 2021

C376t Cavalcante, Laedson Eneas.

Tratamento de resíduos sólidos de laboratório utilizando a técnica de estabilização por solidificação / Laedson Eneas Cavalcante. – Campina Grande, 2021.

104 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.

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

Referências.

1. Resíduo Químico. 2. Encapsulamento. 3. Balanço de Massa. 4. Meio Ambiente. I. Brito, André Luiz Fiquene de. II. Título.

CDU 628.4.045(043)

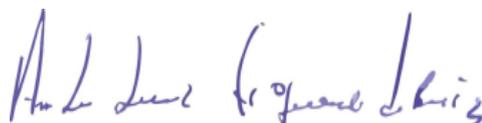
LAEDSON ENEAS CAVALCANTE

**TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE LABORATÓRIO UTILIZANDO  
A TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (PPGEQ/CCT/UFCG), como requisito para obtenção do título grau de Mestre em Engenharia Química.

Aprovado em \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

**EXAMINADORES:**



---

Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito  
Orientador – (UAEQ/CCT/UFCG)



---

Prof.ª Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima  
Examinadora Externa – (UAEB/CDSA/UFCG)



---

Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves  
Examinador Interno – (UAEQ/CCT/UFCG)

**Campina Grande – PB**

**Março de 2021**

## REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

Ata de apresentação da 493ª Dissertação de **Mestrado** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Ao trigésimo primeiro dia do mês de março de dois mil e vinte e um às 14:15 horas, por videoconferência, reuniu-se a **Banca Examinadora** nas formas e termos do Art. 1º e 2º do Regulamento Interno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito (**Orientador /UFCG**), Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves (Examinador Interno /UFCG), e a Profa. Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima (Examinadora Externa /UFCG), para exame da **Dissertação de Mestrado** intitulada “**Tratamento de Resíduos Sólidos de Laboratório Utilizando a Técnica de Estabilização por Solidificação**”, do aluno **Laedson Eneas Cavalcante**. Após a explanação do(a) candidato(a) o(a) Presidente passou a palavra aos componentes da Banca Examinadora. Terminada a arguição, a Banca Examinadora, após reunião secreta, atribuiu os conceitos aqui transcritos: Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito Aprovado, Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves Aprovado, e a Profa. Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima Aprovado. De acordo com o **Artigo 57 do Regulamento Interno do PPGEQ** o(a) candidato(a) foi considerado(a) Aprovado. Encerrada a sessão secreta o(a) Orientador(a) informará o resultado do consenso. Nada mais havendo a tratar foi encerrada a sessão, para constar eu Maricé Pereira da Silva – Secretária do PPGEQ, lavrei a presente Ata que assino com os membros da Banca Examinadora e o(a) candidato(a).

Maricé Pereira da Silva  
Secretária

André Luiz Fiquene de Brito, Doutor, UFCG  
Orientador

José Jailson Nicácio Alves, Doutor, UFCG  
Examinador Interno

Lenilde Mérgia Ribeiro Lima, Doutora, UFCG  
Examinador Interno

Laedson Eneas Cavalcante  
Candidato

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pois acredito que sem ele em minha vida coisas boas não seriam possíveis de acontecer.

A toda minha família, em especial aos meus pais por estarem sempre ao meu lado me apoiando, motivando e incentivando cada sonho conquistado.

Aos meus amigos/irmãos com quem convivi durante essa jornada, em especial, Walber, Bruno e Milla por sempre estarem presentes em todos os momentos.

A meus amigos e companheiros de mestrado, em especial, David Lucas, Bernadete e Josy, que foram amigos que conquistei nesse período de mestrado para a vida toda, sempre juntos superando cada dificuldade imposta.

A todos que fazem parte do LABGER e contribuíram diretamente no desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao meu orientador, professor Dr. André Luiz Fiquene de Brito, pela confiança, paciência, apoio, atenção, orientação e oportunidade de fazer parte de sua equipe de laboratório.

Ao Professor Dr. José Jailson Nicácio Alves por ter aceitado o convite de participar da banca examinadora e colaborar com suas sugestões, arguições e incentivos.

A Prof<sup>a</sup>. Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima por ter aceitado o convite de participar da banca examinadora e contribuir com suas sugestões e todos os ensinamentos, oportunidades e incentivos prestados desde a graduação.

A UFCG, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química e a todos os professores pela formação proporcionada.

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

*“A tua palavra é lâmpada que ilumina os meus passos e luz que clareia o meu caminho”.*  
*Salmo 119*

## RESUMO

A geração de resíduos sólidos acontece em todos os setores sendo a indústria química um dos que mais se destacam na produção de resíduos sólidos industriais em virtude do elevado volume e não aproveitamento da sua matéria-prima. Da mesma forma, porém, em menor quantidade, temos as Instituições Federais de Ensino Superior, onde ocorre uma complexa geração de resíduos sólidos com origens bastante diversificadas. Grande parte dos resíduos são gerados principalmente nos laboratórios de química, devido ao uso de produtos de alta periculosidade produzindo resíduos perigosos, tais como os metais pesados. O tratamento de Resíduos Sólidos de Laboratório (RSL) por meio da técnica de estabilização por solidificação utilizando matriz de cimento vem sendo reconhecida como o melhor processo de tratamento de resíduos perigosos antes da disposição final. O presente trabalho teve como objetivo realizar o tratamento dos resíduos sólidos de Laboratório (RSL) por meio das análises de integridade/durabilidade e imobilização do contaminante em função da demanda química de oxigênio (DQO) usando técnica de estabilização por solidificação, em matrizes de cimento submetidas a diferentes temperaturas de cura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e diferentes concentrações de RSL (%). No experimento foi aplicado o planejamento fatorial tipo  $2^k$  com os fatores T e % de RSL. Foram realizadas as análises de resistência à compressão (RC), potencial hidrogeniônico (pH), capacidade de absorção de água (CAA), umidificação e secagem (U/S), sólidos totais (ST) e suas frações, e demanda química do oxigênio (DQO). Com base nas análises realizadas foi possível observar que o RSL utilizado é um material perigoso devido ao elevado percentual de sólidos totais; as matrizes cimentícias com alto percentual de RSL não foram aprovadas nos ensaios de Durabilidade/Integridade dos contaminantes e a variação de temperatura e o aumento da concentração de RSL influenciaram diretamente nas respostas das análises realizadas. À medida que porcentagem de RSL e a temperatura de cura aumentaram, houve um aumento na concentração de DQO, obtendo o melhor resultado o tratamento utilizando a menor temperatura de cura de  $6^{\circ}\text{C}$  e a menor porcentagem de 10% de RSL ( $50898,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ ). Enquanto o experimento com maior concentração de DQO foi obtido utilizando a maior temperatura de cura ( $50^{\circ}\text{C}$ ) e a maior concentração de RSL (45%), atingindo uma concentração de  $65868,2 \text{ mg.kg}^{-1}$  de DQO. A partir do balanço de massa observou-se que todos os tratamentos retiveram uma quantidade de resíduo na matriz cimentícia, sendo a maior retenção obtida no tratamento submetido à menor temperatura de cura e menor percentual de RSL. Esse valor de retenção em massa de DQO foi de 109,82g ou 109822 mg para cada kg de RSL. Todos os experimentos apresentaram eficiência na retenção do resíduo na matriz cimentícia, reduzindo a lixiviação do resíduo para o meio ambiente, sendo que o tratamento com menor percentual de resíduo e menor temperatura de cura apresentou a maior eficiência na retenção do contaminante (95,84%).

**Palavras-Chave:** Resíduo químico, Encapsulamento, Balanço de massa, Meio ambiente.

## ABSTRACT

The generation of solid waste occurs in all sectors, the chemical industry being one of the most outstanding in the production of industrial solid waste due to the high volume and the lack of use of its raw material. In the same way, however, to a lesser extent, we have the Federal Institutions of Higher Education, where there is a complex generation of solid waste with very diverse origins. Much of the waste is generated mainly in chemistry laboratories, due to the use of highly dangerous products producing hazardous waste, such as heavy metals. The treatment of Laboratory Solid Waste (RLS) by means of the solidification stabilization technique using cement matrix has been recognized as the best process for the treatment of hazardous waste before final disposal. The present work aimed to carry out the treatment of solid laboratory residues (RSL) through the analysis of integrity / durability and immobilization of contaminants in materials with heavy metals using the technique of stabilization by solidification, using cement matrices subjected to different temperatures of cure ( $^{\circ}\text{C}$ ) and different concentrations of RSL (%). In the experiment, a  $2^k$  factorial design with the factors T and % RSL was applied, and the compressive strength (RC), hydrogen potential analysis was performed (pH), water absorption capacity (CAA), humidification and drying (U/S), total solids (ST) and their fractions, and chemical oxygen demand (COD). Based on the analyzes carried out, it is possible to observe that the RSL used is a dangerous material due to the high percentage of total solids; cementitious matrices with a high percentage of RSL were not approved in the contaminants Durability / Integrity tests and the temperature variation and the increase in RSL concentration directly influenced the responses of the analyzes performed. As the percentage of RSL and the cure temperature increased, there was an increase in the COD concentration, obtaining the best result from the treatment using the lowest cure temperature of  $6^{\circ}\text{C}$  and the lowest percentage of 10% of RSL ( $50898.2 \text{ mg.k g}^{-1}$ ). While the experiment with the highest COD concentration was obtained using the highest cure temperature ( $50^{\circ}\text{C}$ ) and the highest RSL concentration (45%), reaching a concentration of  $65868.2 \text{ mg.kg}^{-1}$  of COD. From the mass balance it was observed that all treatments retained an amount of residue in the cementitious matrix, with the highest retention obtained in the treatment subjected to the lowest curing temperature and the lowest percentage of RSL obtaining a contaminant mass retention of 109,82g. All experiments showed efficiency in retaining the residue in the cementitious matrix, reducing the leaching of the RSL into the environment, and the treatment with the lowest percentage of residue and the lowest cure temperature showed the highest efficiency in immobilizing the contaminant (95,84%).

**Keywords:** Chemical waste, Encapsulation, Mass balance, Environment.

## Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1- Geração de resíduos sólidos industriais no Brasil. ....                              | 23 |
| Tabela 2- Geração e lançamento inadequado de resíduos .....                                    | 27 |
| Tabela 3- Fases do clínquer do cimento Portland e os produtos de hidratação das fases. ....    | 31 |
| Tabela 4- Metais essenciais no organismo humano. ....  | 34 |
| Tabela 5 - Níveis dos fatores do processo de estabilização por solidificação. ....             | 39 |
| Tabela 6- Matriz de planejamento fatorial com adição de três pontos centrais. ....             | 40 |
| Tabela 7- Aspectos operacionais para preparação das matrizes cimentícias.....                  | 44 |
| Tabela 8- Composição da matriz cimentícia dos corpos de prova. ....                            | 45 |
| Tabela 9- Análise de variância (ANOVA). ....   | 56 |
| Tabela 10- Superfície de resposta de primeira ordem e o caminho da inclinação ascendente. .... | 58 |
| Tabela 11- Caracterização dos sólidos totais, suas frações e pH.....                           | 60 |
| Tabela 12- Caracterização dos aglomerantes e resíduos de outras pesquisas. ....                | 61 |
| Tabela 13- Critérios de Integridade/Durabilidade e limite máximos permitidos. ....             | 63 |
| Tabela 14- Resultados obtidos para a Umidificação e Secagem. ....                              | 64 |
| Tabela 15- Análise de variância dos resultados de umidificação e secagem. ....                 | 65 |
| Tabela 16- Resultados obtidos para a capacidade de absorção de água. ....                      | 68 |
| Tabela 17- Análise de variância dos resultados de capacidade de absorção de água.....          | 69 |
| Tabela 18 - Respostas do ensaio de Resistência à Compressão (RC). ....                         | 72 |
| Tabela 19 - Uso do material E/S de acordo com a Resistência à Compressão.....                  | 73 |
| Tabela 20-Análise de variância dos resultados de Resistência à compressão. ....                | 74 |
| Tabela 21- Respostas das análises de sólidos totais e umidade dos materiais E/S.....           | 77 |
| Tabela 22 -Análise de variância dos resultados de Sólidos totais dos materiais E/S. ....       | 78 |
| Tabela 23- Análise de variância dos resultados de Sólidos totais fixos dos materiais E/S. .... | 81 |
| Tabela 24- Análise de variância dos resultados de Sólidos totais voláteis dos materiais E/S..  | 83 |
| Tabela 25- Respostas das análises de pH dos produtos formados pela E/S. ....                   | 86 |
| Tabela 26- Análise de variância dos resultados de pH. ....                                     | 86 |
| Tabela 27- Respostas do ensaio de DQO do extrato lixiviado. ....                               | 89 |
| Tabela 28- Respostas das análises de DQO dos produtos formados pela E/S. ....                  | 90 |
| Tabela 29 - Balanço de massa do processo de E/S para DQO no extrato lixiviado.....             | 93 |
| Tabela 30- Eficiência de retenção da matéria orgânica (DQO) no extrato lixiviado. ....         | 95 |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1- Caracterização e classificação dos resíduos sólidos. ....                                 | 25 |
| Figura 2- Classificação de vários métodos de imobilização. ....                                     | 30 |
| Figura 3 - Hidratação do cimento e o aprisionamento de contaminantes.....                           | 33 |
| Figura 4- Aglomerantes utilizados para confeccionar os corpos de prova.....                         | 41 |
| Figura 5- pHmetro utilizado para realizar a leituras das amostras. ....                             | 43 |
| Figura 6- Corpos de Prova confeccionados. ....  | 46 |
| Figura 7- Fluxograma de Avaliação de Materiais Estabilizados por Solidificação de Resíduos<br>..... | 47 |
| Figura 8- Realização do ensaio de Umidificação/Secagem.....   | 49 |
| Figura 9- Ensaio de Capacidade de absorção de água. ....  | 50 |
| Figura 10- Equipamento de resistência à compressão.....   | 51 |
| Figura 11- Equipamento de Lixiviação .....  | 52 |
| Figura 12- Ensaio de Digestão das amostras .....  | 53 |
| Figura 13- Amostras após titulação. ....  | 54 |
| Figura 14- Superfície de contorno da temperatura em função do % RSL para U/S.....                   | 66 |
| Figura 15- Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para CAA. ....                   | 70 |
| Figura 16- Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para RC. ....                    | 75 |
| Figura 17- Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para os ST.....                  | 79 |
| Figura 18-Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para os STF. ....                 | 82 |
| Figura 19- Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para os STV.....                 | 84 |
| Figura 20- Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para pH.....                     | 87 |
| Figura 21-Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para DQO. ....                    | 92 |

## Lista de Quadros

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1- Posições potenciais do CSH ocupadas pelos metais pesados. .... | 32 |
|--|----|

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|         |  |
|---------|--|
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas                 |
| ANOVA   | Análise de Variância                                     |
| APHA    | American Public Health Association                       |
| ASTM    | American Society for Testing and Materials               |
| ATSDR   | Agency for Toxic Substances and Disease Registry         |
| BOP     | Borra Oleosa de Petróleo                                 |
| BTEX    | Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno                   |
| CAA     | Capacidade de Absorção de Água                           |
| C3A     | Aluminato Tricálcio                                      |
| CCT     | Centro de Ciências e Tecnologia                          |
| CH      | Portlandita  |
| CONAMA  | Conselho Nacional do Meio Ambiente                       |
| CP      | Cimento Portland   |
| CPC     | Cimento Portland Composto                                |
| C3S     | Silicato de Tricálcio                                    |
| C2S     | Silicato Dicálcio  |
| CSH     | Silicato de cálcio hidratado                             |
| DQO     | Demanda Química de Oxigênio                              |
| EPA     | Environmental Protection Agency                          |
| E/S     | Estabilização por solidificação                          |
| HPA     | Hidrocarboneto Policíclico Aromático                     |
| HTP     | Hidrocarboneto Total de Petróleo                         |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia                         |
| LABGER  | Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos |
| LMP     | Limite máximo permissível                                |
| MPa     | Mega Pascal  |
| NBR     | Norma Brasileira   |
| OMS     | Organização Mundial da Saúde                             |
| pH      | Potencial Hidrogeniônico                                 |
| PtCt    | Ponto Central  |
| RC      | Resistência à compressão                                 |
| RSL     | Resíduo Sólido de Laboratório                            |

|       |   |
|-------|---|
| ST    | Sólidos Totais                                |
| STF   | Sólidos Totais Fixos                          |
| STV   | Sólidos Totais Volátiles                      |
| Tc    | Tempo de cura                                 |
| UAEQ  | Unidade Acadêmica de Engenharia Química       |
| U/S   | Umidificação/Secagem                          |
| USEPA | United States Environmental Protection Agency |
| UFCG  | Universidade Federal de Campina Grande        |

## Sumário

|   |    |
|---|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | 18 |
| 1.1 OBJETIVOS .....   | 19 |
| 1.1.1 OBJETIVO GERAL .....  | 19 |
| 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 20 |
| <b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....  | 21 |
| 2.1 Problemática e Geração de Resíduos Sólidos Industriais .....                        | 21 |
| 2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS .....                              | 24 |
| 2.1.2 Geração de Resíduos Sólidos de Laboratório .....                                  | 26 |
| 2.2 ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO (E/S) .....   | 28 |
| 2.3 ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO DE CONTAMINANTES .....                              | 33 |
| 2.4 ESTADO DA ARTE .....  | 35 |
| <b>3 METODOLOGIA</b> .....  | 39 |
| 3.1 ETAPA I: PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....  | 39 |
| 3.2 ETAPA II: CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....                        | 40 |
| 3.2.1. Análises Físicas .....   | 41 |
| 3.2.2. Análise Química .....  | 42 |
| 3.3 ETAPA III: PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....                                     | 43 |
| 3.4 ETAPA IV: ENSAIO DE INTEGRIDADE/DURABILIDADE E IMOBILIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES ..... | 46 |
| 3.4.1 Umidificação e secagem .....  | 48 |
| 3.4.2 Capacidade de Absorção de Água .....  | 49 |
| 3.4.3 Resistência à compressão .....  | 50 |
| 3.4.4 Lixiviação .....  | 51 |
| 3.4.5 DQO .....   | 52 |
| 3.4.6 Análises físicas e químicas .....   | 54 |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.5 EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DOS CONTAMINANTES .....                                     | 55        |
| 3.6 DETERMINAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA DOS CONTAMINANTE.....                             | 55        |
| 3.7 ETAPA V: ANÁLISE ESTATÍSTICA .....   | 56        |
| 3.7.1 Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ).....                                       | 57        |
| 3.7.2 Coeficiente de correlação entre as variáveis (R) .....                           | 57        |
| 3.7.3 Porcentagem máxima de variação explicável.....                                   | 57        |
| 3.7.4 Modelo: Planejamento Fatorial Com Adição de Ponto Central .....                  | 58        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>  | <b>60</b> |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO, AREIA E RSL.....  | 60        |
| 4.2 AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE E DURABILIDADE.....                                       | 63        |
| 4.2.1 UMIDIFICAÇÃO E SECAGEM .....   | 63        |
| 4.2.1.1 Análise Variância (ANOVA): Umidificação e Secagem .....                        | 65        |
| 4.2.1.2 Modelo e Gráfico para o percentual de Umidificação e Secagem .....             | 66        |
| 4.2.2 CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE AGUA .....   | 67        |
| 4.2.2.1 Análise Variância (ANOVA): Capacidade de absorção de água .....                | 69        |
| 4.2.2.2 Modelo e Gráfico para o percentual de Capacidade de absorção de água .....     | 70        |
| 4.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....   | 72        |
| 4.2.3.1 Análise Variância (ANOVA): Resistência à compressão .....                      | 74        |
| 4.2.3.2 Modelo e Gráfico para o percentual de Resistência à compressão.....            | 74        |
| 4.2.4.UMIDADE, SÓLIDOS TOTAIS, SÓLIDOS TOTAIS VOLÁTEIS E SÓLIDOS<br>TOTAIS FIXOS ..... | 77        |
| 4.2.4.1. Análise Variância (ANOVA): Sólidos Totais .....                               | 78        |
| 4.2.4.2. Modelo e Gráfico para o teor de Sólidos Totais.....                           | 79        |
| 4.2.4.3. Análise Variância (ANOVA): Sólidos Totais Fixos .....                         | 80        |
| 4.2.4.4. Modelo e Gráfico para o teor de Sólidos Totais Fixos.....                     | 81        |
| 4.2.4.5. Análise Variância (ANOVA): Sólidos Totais Voláteis.....                       | 83        |
| 4.2.4.6. Modelo e Gráfico para o teor de Sólidos Totais voláteis .....                 | 84        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2.5 ANÁLISE DE PH.....                                  | 85        |
| 4.2.5.1. Análise Variância (ANOVA): pH .....              | 86        |
| 4.2.5.2 Modelo e Gráfico para o percentual de pH.....     | 87        |
| 4.3 AVALIAÇÃO DA IMOBILIZAÇÃO DO CONTAMINANTE: DQO.....   | 88        |
| 4.3.1 Análise da Demanda Química de Oxigênio (DQO) .....  | 88        |
| 4.3.1.1. Análise Variância (ANOVA): DQO .....             | 90        |
| 4.3.1.2 Modelo e Gráfico para a concentração de DQO.....  | 91        |
| 4.4 BALANÇO DE MASSA E EFICIÊNCIA NA REDUÇÃO DA DQO ..... | 93        |
| 4.4.1 Balanço de Massa dos Contaminantes .....            | 93        |
| 4.4.2. Eficiência de Retenção da Matéria Orgânica .....   | 95        |
| <b>5 CONCLUSÕES.....</b>                                  | <b>98</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                  | <b>99</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sólidos acontece em todos os setores da sociedade e não pode ser eliminada completamente. Seja no setor produtivo, no de serviços ou consumo, em todos os lugares e situações, resíduos são gerados. A indústria química é uma das que mais se destacam na produção de resíduos sólidos industriais em virtude do elevado volume e do não aproveitamento da sua matéria-prima (ROTH; GARCIAS, 2008).

Da mesma forma, porém, em menor quantidade, temos as Instituições Federais de Ensino Superior, onde ocorre uma complexa geração de resíduos sólidos com origens bastante diversificadas. Grande parte dos resíduos gerados nas Instituições Federais são oriundos principalmente dos laboratórios de química, devido ao uso de produtos de alta periculosidade produzindo resíduos contendo materiais perigosos, como os metais pesados, altamente tóxicos para o meio ambiente e os seres humanos (BITTENCOURT, 2014).

Desta forma, é necessário desenvolver um plano de gerenciamento dos Resíduos Sólidos de Laboratório (RSL) adequado para realizar o tratamento dos resíduos perigosos que são gerados durante as atividades experimentais, dando aos mesmos uma disposição final apropriada, para que não venham causar problemas ambientais quando estiverem expostos na natureza.

Os Resíduos Sólidos de Laboratório podem ser classificados em duas classes: os perigosos (Classe I) e em não perigosos (Classe II) que são divididos em dois sub-grupos: Classe II-A (não-inertes) que apresentam concentrações de contaminantes maiores que o permitido e a Classe II-B (inertes) que apresentam contaminantes que se solubilizam em água em níveis aceitáveis. Trabalhos realizados por Lima (2018); Silva (2018); Paixão (2019), classificaram o RLS como classe I.

A busca de tratamentos eficazes que possam ser implementados a um custo acessível é um problema de difícil solução para o gerenciamento de resíduos sólidos. Nas últimas décadas, as restrições quanto ao uso do solo para disposição final de resíduos, principalmente aqueles considerados perigosos, têm se tornado cada vez mais severa, requerendo das empresas que tratam e dispõem esses resíduos a busca de alternativas de tratamentos seguros.

A técnica de tratamento de Resíduos Sólidos de Laboratório usando a estabilização por solidificação (E/S) antes da disposição final é utilizada há mais de 50 anos (SPENCE; SHI, 2005; CONNER, 1990) e seu objetivo é a melhoria do manuseio dos resíduos, o encapsulamento dos contaminantes a partir de sua retenção em matriz sólida que restringe a

mobilidade para o meio ambiente (BRITO, 2007) e prover um material com alta resistência e durabilidade.

No Brasil, utiliza-se a norma da ABNT NBR 9778 para avaliar a capacidade de absorção de água dos produtos estabilizados por solidificação. O ensaio de capacidade de adsorção de água (CAA), tem a função de avaliar a durabilidade do composto e determinar a quantidade de água presente nos poros permeáveis de um material sólido, estando relacionada com a porosidade dos materiais e influencia os ensaios de resistência à compressão e lixiviação (SPENCE; SHI, 2005).

O aumento da absorção de água diminui a resistência e conseqüentemente aumenta a lixiviação. A umidade avalia o teor de água presente no resíduo. O ensaio de umidificação e secagem (U/S), consiste em avaliar a durabilidade do material por meio da mudança de temperatura. O ensaio de resistência à compressão avalia a integridade do material exposto a diferentes cargas de compressão mecânica.

Para a disposição final dos resíduos sólidos de laboratório, mesmo sob tratamento, é necessário averiguar aspectos de integridade e durabilidade, imobilização de contaminantes e avaliação ambiental, com o propósito de tratar o RSL, buscando atingir um resultado satisfatório que diminua o risco desses contaminantes, transformando esses resíduos perigosos em não perigosos, utilizando a E/S. Neste sentido, é necessário pesquisar alternativas de tratamento seguras para a posterior disposição e/ou utilização do produto final, sobretudo daquele que contém metais pesados.

O presente trabalho realizou o tratamento do resíduo sólido de laboratório e avaliou a imobilização e integridade/durabilidade dos materiais solidificados em matriz de cimento com base nas análises de resistência à compressão, pH, capacidade de absorção de água, umidificação e secagem, sólidos totais e suas frações, lixiviação e DQO.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar o tratamento dos resíduos sólidos de Laboratório por meio das análises de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes em materiais com metais pesados a partir da técnica de estabilização por solidificação, utilizando matrizes de cimento submetidos a diferentes temperaturas de cura e diferentes concentrações de RSL.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar e classificar o cimento, areia e resíduo sólido de laboratório.
- Realizar a estabilização por solidificação e incorporação de metais pesados em matriz de cimento, para converter o material perigoso em não perigoso.
- Avaliar a integridade/durabilidade do material estabilizado por solidificação a partir das análises de capacidade de absorção de água, resistência à compressão, umidificação e secagem.
- Avaliar a imobilização de contaminantes em material estabilizado por solidificação a partir das análises de lixiviação e DQO.
- Fazer o balanço de massa do material estabilizado por solidificação.
- Calcular a eficiência de retenção do material estabilizado por solidificação após realização das análises de integridade e durabilidade e imobilização dos contaminantes.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Problemática e Geração de Resíduos Sólidos Industriais

Desde o início do século XVIII devido ao avanço causado pela Revolução Industrial ocorreu uma enorme mudança no desenvolvimento econômico e social da população. Com a chegada da revolução Industrial, houve a implementação de várias indústrias, aumentando a produção em larga escala e conseqüentemente o desenvolvimento da economia. Com isto surgiu uma série de fatores como: necessidade de mais matéria-prima; combustível; mão-de-obra; mercado, o que em contrapartida trouxe alguns problemas como: maior geração de resíduos; emissão de gás carbônico; contaminação do solo, do ar e da água (VIEIRA; BELTRAME, 2019).

Esses problemas vêm se agravando ao longo do tempo devido ao aumento da produção industrial. Com isso, vem se buscando soluções apropriadas para minimizar a enorme quantidade de resíduos sólidos que é produzida. Uma dessas soluções é aplicar técnicas para diminuir sua periculosidade dos mesmos, tendo em vista que o descarte inadequado desses resíduos compromete diretamente a qualidade de vida da sociedade e do meio ambiente (PEREIRA; CURI, 2013; EFING; PAIVA, 2016).

Nos últimos anos, a geração de resíduos sólidos nos processos industriais vem tendo grande destaque por causa do enorme volume produzido (VENZON *et al.*, 2018). Esse fato apresenta maior relevância nas grandes metrópoles brasileiras devido à maior concentração de indústrias nessas regiões. O país conta com cerca de 160 mil indústrias de transformação, gerando anualmente cerca de 98 milhões de toneladas de resíduos sólidos industriais, sendo que desse total 96% correspondem a resíduos não perigosos, e, 4% a resíduos perigosos (IPEA, 2012).

De acordo com a Resolução CONAMA n° 313/2002, Resíduo Sólido Industrial é todo resíduo que resulte de processos industriais e que se encontre nos estados sólido, semissólido, gasoso (quando contido) e líquido, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou necessitem de soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Além disso, ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.

Devido ao rápido desenvolvimento industrial, um enorme volume de resíduos sólidos contendo metais pesados são gerados e emitidos para o meio ambiente. Devido ao seu grave

impacto sobre a saúde humana e qualidade de vida dos ecossistemas a geração destes resíduos tem causado preocupação e chamado a atenção da sociedade (CHENG *et al.*, 2018).

No Brasil existem poucos dados atualizados referentes à geração de resíduos sólidos industriais, dificultando as autoridades públicas a tomar medidas e decisões para favorecer a preservação e sustentabilidade do meio ambiente (VENZON *et al.*, 2018). Devido à grande diversidade de resíduos sólidos industriais que são produzidos é necessário o desenvolvimento de técnicas e tratamentos específicos para cada tipo de resíduo, implicando na instauração da gestão de resíduos sólidos dentro das próprias indústrias (ALTOÉ; VOESE, 2014).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, “resíduos industriais” são resíduos gerados durante os processos produtivos e instalações industriais. No final dos processos industriais são gerados os resíduos contendo alguma quantidade de material perigoso, necessitando de um tratamento adequado devido ao seu alto potencial de periculosidade capaz de causar danos à saúde e ao meio ambiente (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011).

De acordo com os dados da Tabela 1 disponíveis no Plano de Resíduos Sólidos (MMA, 2012), a geração de resíduos sólidos industriais no Brasil compostos pelos Inventários Estaduais e Panoramas de estimativas de geração dos RSI, abrangendo um total de 13 Estados. Devido à grande variedade e quantidade de indústrias distribuídas pelo país, os Inventários parciais dos Estados nem sempre foram elaborados com a mesma tecnologia, períodos e classificações. A análise dos inventários estaduais demonstra uma deficiência no levantamento real dos dados com resultados discrepantes necessitando de uma padronização, revisão e atualização das informações.

Tabela 1- Geração de resíduos sólidos industriais no Brasil.

| UF    | PERIGOSOS<br>(T.ano <sup>-1</sup> ) | NÃO<br>PERIGOSOS(T.ano <sup>-1</sup> ) | TOTAL(T.ano <sup>-1</sup> ) |
|-------|-------------------------------------|--|-----------------------------|
| AC*   | 5.500                               | 112.765                                | 118.265                     |
| AP*   | 14.341                              | 73.211                                 | 87.552                      |
| CE*   | 115.238                             | 393.831                                | 509.069                     |
| GO*   | 1.044.947                           | 12.657.326                             | 13.702                      |
| MT*   | 46.298                              | 3.448.856                              | 3.495.154                   |
| MG*   | 828.183                             | 14.337.011                             | 15.165.194                  |
| PB*   | 657                                 | 6.128.750                              | 6.129.407                   |
| PE*   | 81.583                              | 7.267.930                              | 7.349.513                   |
| PR**  | 634.543                             | 15.106.393                             | 15.740.936                  |
| RN*   | 3.363                               | 1.543.450                              | 1.546.813                   |
| RS*   | 182.170                             | 946.900                                | 1.129.070                   |
| RJ**  | 293.953                             | 5.768.562                              | 6.062.515                   |
| SP**  | 535.615                             | 26.084.062                             | 26.619.677                  |
| TOTAL | 3.786.391                           | 93.869.046                             | 97.655.438                  |

Fonte: \* Inventários Estaduais de R.S.I. e \*\* Panorama das Estimativas de Geração de Resíduos Industriais – ABETRE/FGV – MMA, (2012) e IPEA (2012).

A partir dos dados apresentados pela Tabela 1, é possível afirmar que os valores apresentaram variações de um estado para outro. Isso também tem relevância devido à quantidade de indústrias inventariadas dos estados dos CE, MT e RS ser muito maior do que estados similares como PE, GO e MG. Com isso, não houve uma similaridade dos tipos de indústrias em nível nacional. (GUIMARÃES, 2017).

A Paraíba se destaca por ser o estado que apresenta a menor quantidade de geração de resíduos perigosos por ano, produzindo 657 toneladas por ano, e 6.128.750 toneladas de resíduos considerados não perigosos. Acredita-se que esse resultado seja devido ao baixo número de indústrias presentes no estado nessa época, que gerem resíduos perigosos em relação aos outros estados.

Baseado nos números de resíduos sólidos apresentados pelos estados mencionados acima não foi possível realizar uma compilação satisfatória entre os valores relacionados à quantidade

de resíduos perigosos produzidos pelos estados, pois, os estados do Ceará (CE), Minas Gerais (MG) e Pernambuco (PE) separam os resíduos perigosos dos resíduos não perigosos bem como, os resíduos inertes dos não inertes, adotando como forma de destinação a própria indústria, fora da indústria e sem destino. (MMA, 2012).

### 2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

Devido à grande variedade de atividades desenvolvidas no setor industrial, ocorre a geração de resíduos sólidos. Resíduos estes que podem ser líquidos e gasosos durante seus processos produtivos, contribuindo para poluir e/ou contaminar o solo, a água e o ar (Guimarães, 2017). Os resíduos podem se apresentar na forma de metais, escórias, vidros, cerâmicas, cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papéis, madeiras, fibras, borrachas, dentre outros (GUIMARÃES, 2008).

Segundo a ABNT NBR 10.004 (2004a), a classificação dos resíduos sólidos pode ser feita por meio da identificação do processo ou pela atividade a qual lhe deu origem bem como as características de seus constituintes, comparando estes constituintes com informações de resíduos e substâncias dos quais é conhecido o seu impacto à saúde e ao meio ambiente conforme as normas técnicas.

A identificação dos constituintes do resíduo deve ser analisada de forma criteriosa estabelecida conforme os insumos, matérias-primas, e o processo de origem do resíduo. Além disso, outros métodos analíticos, reconhecidos em nível internacional, podem ser exigidos pelo Órgão de Controle com o propósito de determinar o grau de risco ambiental e saúde humana, dependendo do tipo e complexidade do resíduo.

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), resíduo sólido é definido como “resíduos no estado sólido e semissólido resultante de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição lodos provenientes dos sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam para isto soluções técnicas e economicamente viáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

Conforme a NBR 10.004 da ABNT (2004), os resíduos sólidos podem ser classificados em:

#### CLASSE I – RESÍDUOS PERIGOSOS

São resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que, em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (propriedades físicas, químicas e infecto-contagiosas de alta periculosidade), podendo apresentar risco à saúde pública, provocando ou contribuindo para um aumento de mortalidade ou incidência de doenças; e apresentarem efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou destinados de forma inadequada.

## CLASSE II – RESÍDUOS NÃO PERIGOSOS

Os resíduos Classificados são divididos em duas classes:

II A: NÃO INERTES - São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos Classe I – Perigosos ou de Classe II B. Os resíduos Classe II podem apresentar propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

II B: INERTES- Resíduos sólidos ou mistura de resíduo sólido que, ao serem submetidos ao teste de solubilidade, proposta na norma NBR-10.006 Solubilização de Resíduos – Procedimento, não têm nenhum de seus constituintes solubilizados, em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

Na Figura 1, está ilustrado o fluxograma referente à caracterização e classificação dos resíduos sólidos conforme sua periculosidade.

Figura 1- Caracterização e classificação dos resíduos sólidos.



Fonte: ABNT NBR 10.004, 2004.

Cada estado possui leis que estabelecem a Política dos Resíduos Sólidos, porém, nem sempre apresentam as mesmas classificações e denominações, dificultando a comparação entre categorias, acarretando em problemas para o transporte interestadual, para o tratamento e disposição dos resíduos (MELCHERT, 2012). Devido a essas variações ocorreu uma

importante regulamentação na área de resíduos com a aprovação da Lei no 12.305/2010, Brasil (2010), instituindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que teve como principal objetivo a não geração, redução, reuso, tratamento; incentivando a reciclagem e o reaproveitamento dos resíduos sólidos.

A Lei no 12.305/2010 sobre PNRS, também estabelece que os geradores de resíduos industriais elaborem um plano de gerenciamento de resíduo sólido com definição das metas e procedimento para redução da geração dos seus resíduos. As siderúrgicas, indústrias químicas, refinarias de petróleo, indústrias de metais não ferrosos, de papel e celulose, de processamento de couros e as de instalações são os setores responsáveis pelas atividades de maior potencial de geração de resíduos perigosos, sendo os metais pesados os principais resíduos gerados, pois são bastante utilizados na indústria e estão presentes em vários produtos (MELCHERT, 2012).

O descarte desses resíduos de forma incorreta no solo, na atmosfera ou na água, pode acarretar na contaminação da área a qual têm um enfoque sistêmico, englobando ecossistemas afetados, agravos à saúde humana, às construções, a desativação de instalações produtivas (MELCHERT, 2012).

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), várias enfermidades como uma simples alergia até problemas mais graves como doenças respiratórias, cancerígenas e em alguns casos complicações que podem levar à morte são causadas devido à presença de metais pesados no meio ambiente.

Os resíduos são gerados praticamente em todos setores industriais, porém, algumas indústrias requerem uma atenção especial devido ao seu elevado potencial tóxico, em decorrência dos resíduos gerados durante o processo de produção, bem como da quantidade produzida, necessitando que haja um gerenciamento adequado para reduzir os impactos ambientais que são causados. Da mesma forma, os resíduos químicos gerados nos laboratórios e centros de pesquisas causam os mesmos danos ao meio ambiente quando são descartados de forma inadequada.

#### 2.1.2 Geração de Resíduos Sólidos de Laboratório

Os resíduos gerados em laboratório se diferenciam daqueles produzidos nos setores industriais por produzirem uma menor quantidade, porém, requerem uma preocupação especial por gerar um grande problema devido à dificuldade da padronização e eficiência no gerenciamento e tratamento desses materiais por apresentarem uma vasta composição de materiais de alta periculosidade, como metais pesados, e inconstante nível de toxicidade com propriedades físico-químicas que variam constantemente conforme os tipos de atividades que são realizadas nos laboratórios (PENATTI; GUIMARÃES; SILVA, 2011).

Os resíduos de laboratório são divididos em resíduos ativos e resíduos passivos. Os resíduos ativos são aqueles gerados durante atividades rotineiras das Universidades, sendo produzidos em maior quantidade (ensino, pesquisa, extensão, prestação de serviços médicos à comunidade). O resíduo passivo engloba todo resíduo estocado, que não é caracterizado e está à espera do gerenciamento e destinação final, integrado por restos reacionais, resíduos sólidos e frascos de reagentes vencidos. Frequentemente é encontrado nos laboratórios de instituições superiores de ensino um estoque indesejável de resíduos químicos sólidos, líquidos e gasosos não caracterizados (LIMA, 2010).

Grande parte dos laboratórios descarta seus resíduos diretamente na pia, não podendo garantir que existe um monitoramento real da quantidade de resíduo químico gerado pelo laboratório. Geralmente quase todo o resíduo gerado com volume de até 10 L é descartado “pia abaixo”. Da mesma forma acontece em laboratórios que geram volumes mensais de resíduos superiores a 50 L. Em relação ao resíduo na forma sólida, cerca de 40% também é descartado de forma inadequada, sendo jogado em lixo comum (IMBROISI, 2006).

A Tabela 2 exhibe a relação entre volume de resíduos gerados e destinação inadequada, em “pia abaixo” ou em lixo comum.

Tabela 2- Geração e lançamento inadequado de resíduos

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

Fonte: IMBROISI (2006).

De acordo com a Tabela 2, cerca de 45% dos laboratórios produzem um volume de 1 a 10 litros de resíduos por mês com 82% de descarte inadequado e apenas 5% dos laboratórios geram resíduos sólidos, porém a quantidade de resíduo sólido não foi informada. O que se sabe é que 40% têm lançamento inadequado causando poluição tanto do solo quanto do lençol freático, comprometendo diretamente a qualidade do meio ambiente e da sociedade, principalmente devido à elevada quantidade de metais pesados existentes nesse resíduos.

Devido ao alto nível de periculosidade que os metais pesados presentes nos resíduos sólidos oferecem para a sociedade e ecossistema, o processo de estabilização por solidificação (E/S) é uma das técnicas que vem sendo amplamente utilizada, por ter a capacidade de reter contaminantes numa matriz cimentícia sólida restringindo, fisicamente, sua mobilidade e a sua transformação química em uma forma menos solúvel, reduzindo a periculosidade do mesmo (GUIMARÃES, 2017).

## 2.2 ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO (E/S)

A Estabilização/Solidificação é uma técnica utilizada no tratamento de resíduos sólidos que apresentam metais pesados, na qual são empregados aditivos melhorando as características físicas do composto para reduzir a mobilidade dos poluentes, transformando esses poluentes em materiais não perigosos ou aceitáveis para as normas de disposição vigentes, reduzindo os danos que podem vir a causar no meio ambiente e à saúde humana. Entretanto, o sucesso da técnica E/S possui grande influência do tipo de ligante utilizado, pois, é necessária a identificação de materiais capazes de fixar os contaminantes em suas matrizes (IVANOV *et al.* 2016).

A United States Environmental Protection Agency (USEPA, 1988), afirma que os termos solidificação e estabilização são denominações genéricas, utilizados para determinar uma vasta variedade de tecnologias que estão associadas e que utilizam produtos químicos e/ou processo físicos para diminuir significativamente os impactos negativos oriundos da disposição inadequada dos resíduos sólidos perigosos no meio ambiente.

De acordo com Melchert (2012) a técnica de Estabilização e Solidificação consiste em um processo de tratamento utilizado para atingir um ou mais dos seguintes objetivos:

- Melhorar o manuseio e a destinação final dos resíduos.
- Reduzir a área superficial ao longo da massa de resíduo no caso de ocorrer perda ou transferência de contaminante.
- Limitar a solubilidade de qualquer constituinte perigoso do resíduo por meio de um ajuste de pH ou pelo fenômeno de adsorção.
- Transformar um resíduo perigoso em um novo produto compósito não perigoso.

Segundo Shi e Spence (2005), a E/S é a melhor metodologia a ser empregada no tratamento de resíduos sólidos, uma vez que foi regularizada para 57 tipos de resíduos nos Estados Unidos. De acordo com Brito e Soares (2009), a E/S pode ser dividida em processos orgânicos e inorgânicos. No primeiro, utilizam-se como agentes ligantes os polímeros naturais

(como ureia e epóxido) e artificiais (como os polímeros termorrígidos e termoplásticos). E no segundo, utilizam-se como agentes ligantes o cimento Portland e material pozolânico. Ainda assim, a USEPA (1988) propõe a combinação de processos orgânicos e inorgânicos.

Na E/S a retenção dos contaminantes existentes em um determinado resíduo perigoso envolve mecanismos físicos, químicos ou a junção de ambos. No processo de estabilização física ocorre a solidificação ou encapsulamento do contaminante alterando a forma física sem, necessariamente, ocorrerem ligações químicas dos constituintes do resíduo. Já no processo de estabilização química, acontece a modificação dos estados químicos dos constituintes transformando em uma forma menos solúvel em água (BRITO; SOARES, 2009).

Os estudos relacionados aos mecanismos de ligação dos metais pesados em misturas de resíduos de cimento avançaram desde o início dos anos 1980, iniciando com investigações referentes a resíduos, cimentos e argamassas estabilizados com cimento contendo altas concentrações de metais pesados. Cada íon possui próprias propriedades geoquímicas, fazendo que o mecanismo de ligação seja diferente de um metal pesado para outro. Além disso, generalizando que os cátions precipitam como hidróxidos e/ou são absorvidos pelos minerais de hidratação do cimento, especialmente o hidratato de silicato de cálcio (CSH), devido à sua alta concentração de sítios superficiais (BEN MAAOUIA *et al.* 2018).

## **ESTABILIZAÇÃO E SOLIDIFICAÇÃO UTILIZANDO CIMENTO**

A técnica de estabilização por solidificação utilizando matriz de cimento vem sendo reconhecida como o melhor processo de tratamento de resíduos perigosos de acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) por ser um processo de baixo custo, simplicidade de operação e alto desempenho, sendo amplamente utilizada em países desenvolvidos. Além disso, devido ao alto pH alcalino, substâncias alcalinas, como  $\text{Ca(OH)}_2$  e materiais à base de cimento são amplamente utilizados para tecnologias de imobilização combinadas com o tratamento de resíduos perigosos (CHENG *et al.* 2018).

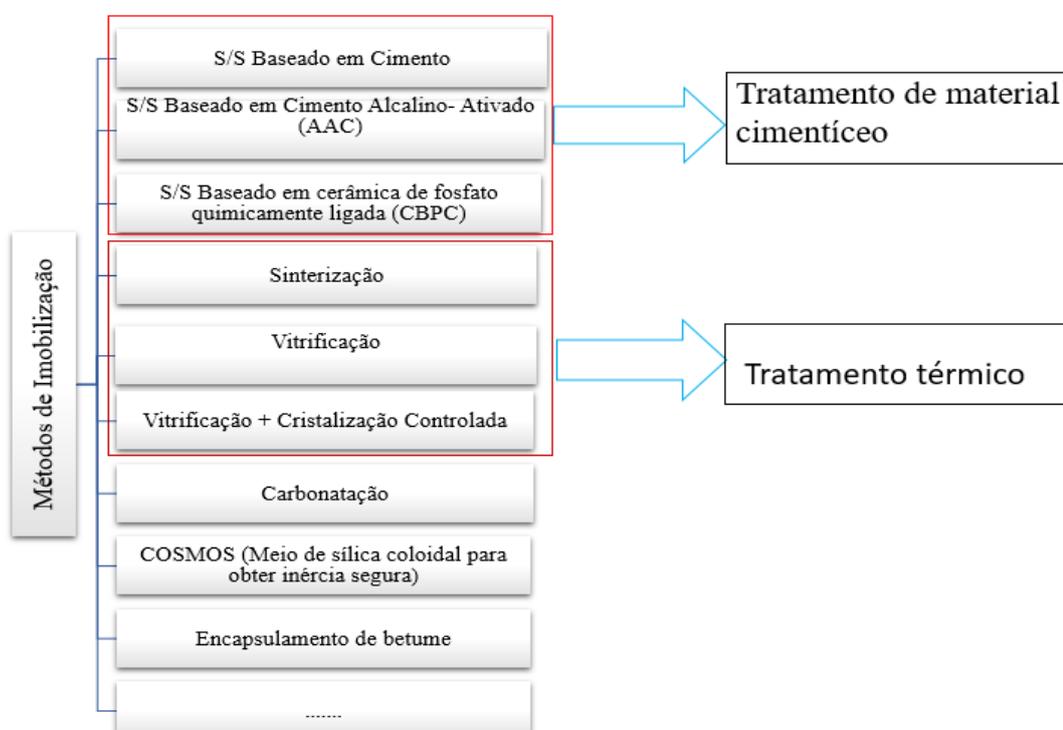
No processo E/S, os metais pesados têm a capacidade de reagir de uma ou mais das seguintes formas: adsorção, precipitação, complexação superficial, troca iônica, quimissorção, passivação, inclusões (microencapsulação) e incorporação química no sistema de cimento hidratado (LIU *et al.* 2019)

Nas últimas décadas diversos métodos de imobilização vêm sendo desenvolvidos para o tratamento de metais pesados, tais como cimento à base de estabilização/solidificação (E/S) (UCAROGLU; TALINLI, 2012), geopolimérica baseado E/S (GUO *et al.*, 2017), a

vitriificação ( CORUH; ERGUN, 2006 ), carbonatação ( LI *et al.*, 2007 ), sílica coloidal meio para se obter inércia segura (COSMOS) ( BENASSI *et al.*, 2016 ).

Na Figura 2 pode-se observar a classificação de alguns dos métodos de imobilização que são utilizados. Dentre esses métodos, os tratamentos com materiais cimentícios e os tratamentos térmicos se apresentam como os dois tipos de métodos mais procurados, pois esses tratamentos têm a capacidade de isolar os metais pesados em suas formas residuais densas e duráveis . Além disso, existem outros métodos tais como a estabilização de aditivos químicos, por meio da carbonatação. Porém, esses métodos possuem uma eficiência menor de isolamento de metais pesados comparado aos outros tipos de tratamentos ( GUO *et al.* 2017 ).

Figura 2- Classificação de vários métodos de imobilização.



Fonte: Adaptado de GUO *et al.* (2017).

E/S utilizando o cimento Portland como aglutinante primário é composta principalmente por quatro etapas de clínquer cristalino ( SHI; SPENCE, 2004 ). A E/S usando cimento é o método mais aplicado em pesquisas e tratamentos de resíduos sólidos, pois a composição do cimento Portland é consistente de fonte para fonte e a configuração dos processos de endurecimento do cimento são claramente compreendidos. (CONNER; HOEFFNER, 1998).

Muitos resíduos sólidos tem a capacidade de retardar ou acelerar a hidratação do cimento (SHI; KAN, 2009a ). Além disso, alguns componentes dos resíduos como, por exemplo a presença de sulfato, podem causar efeitos deletérios sobre o cimento endurecido, pois a elevada

concentração de sulfato podem degradar a propriedade mecânica dos desperdícios e arruinar os efeitos de imobilização (SHI; SPENCE, 2004). Portanto, é necessário fazer um planejamento cuidadoso da fórmula para E/S baseada em cimento antes da aplicação em escala total (GUO *et al.* 2017).

Na Tabela 3 podem-se observar as fases do clínquer do cimento Portland e os produtos de hidratação dessas fases. Os resíduos sólidos possuem a capacidade de atuar como agregados ou reagir parcialmente com os componentes do cimento durante o processo de imobilização. Esse tratamento à base de cimento pode sofrer complicações tendo em vista que os componentes dos resíduos interferem diretamente na hidratação do cimento (GUO *et al.* 2017).

Tabela 3- Fases do clínquer do cimento Portland e os produtos de hidratação das fases.

| <b>FASES PRINCIPAIS</b>   | <b>CONSTITUINTES<br/>% EM PESO</b> | <b>PRODUTOS DE HIDRATAÇÃO</b>   |
|---|------------------------------------|---|
| <b>SILICATO DE TRICÁLCIO, OU <math>CA_3SIO_5</math></b>   | 50–70                              | Hidrato de silicato de cálcio (C – S – H), portlandita (CH ou $Ca(OH)_2$ )  |
| <b>BELITE, SILICATO DICÁLCICO, OU B-<math>CA_2SIO_4</math></b>                                      | 15 a 30                            | Hidrato de silicato de cálcio, portlandite  |
| <b>ALUMINATO, ALUMINATO TRICÁLCICO, OU <math>CA_3AL_2O_6</math></b>                                 | 5–10                               | Hidrato de alumínio( $C_3AH_6$ ou $3CaOAl_2O_3 \cdot 6H_2O$ ), etringita( $3CaOAl_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ), de monossulfato ( $3CaOAl_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ ) |
| <b>CELITE, ALUMINOFERRITE, <math>CA_2(Fe_{1-x}Al_x)_2O_5</math>, <math>0 &lt; x &lt; 0,7</math></b> | 5–15                               | Etringita, monossulfato, $C_3(A, F)H_6$ ou $3CaO \cdot (Al_2O_3, Fe_2O_3) \cdot 6H_2O$  |

Fonte: CHEN *et al.* (2009b); TAYLOR (1997).

Os mecanismos de imobilização de metais pesados podem ser classificados em dois grupos: (a) estabilização química: transformando metais pesados em espécies menos solúveis ou formas menos tóxicas, (b) encapsulamento físico: encapsulando metais pesados em uma forma de baixa permeabilidade e isolando os mesmos do ambiente. Em geral, esses mecanismos ocorrem simultaneamente. A diferença dos dois mecanismos é que a estabilização química ocorre em escala atômica, enquanto o encapsulamento físico ocorre em escalas maiores (CHEN *et al.*, 2009B ; SOROKA, 1979 ; TAYLOR, 1997 ).

Os metais pesados podem ser incorporados nos produtos de hidratação do cimento, como CSH, etringita e monossulfato, além disso, os metais pesados podem reagir com outros componentes do cimento formando precipitados (GUO *et al.* 2017).

O CSH, é uma mistura de minerais cristalinos e uma fase mal ordenada, sendo o principal produto de hidratação do cimento Portland (RICHARDSON, 2008; TAYLOR, 1997). De acordo com Vespa *et al.* (2014), representa três posições potenciais ocupadas pelos metais pesados na estrutura de referência da CSH à estrutura da tobermorite.

O Quadro 1 ilustra as posições potenciais ocupadas pelos metais pesados na matriz CSH. Diversos pesquisadores afirmam que a adsorção de metais pesados na superfície da CSH é a primeira etapa antes da incorporação de contaminações em sua estrutura ( MELLADO *et al.*, 2012 ).

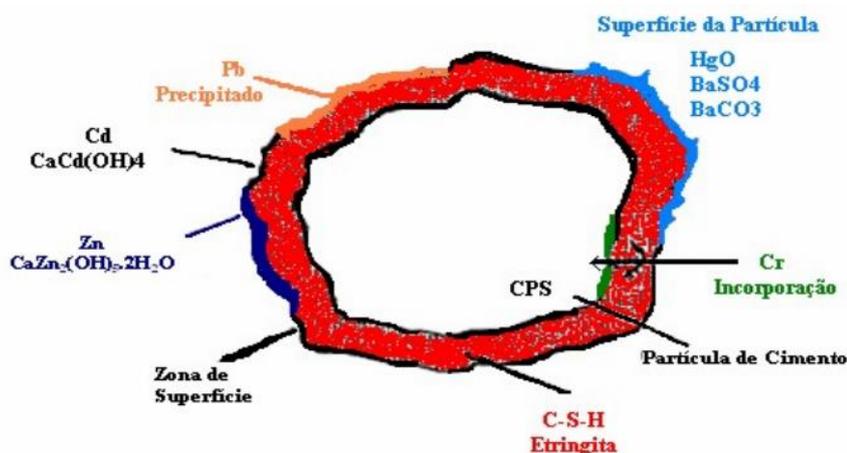
Quadro 1- Posições potenciais do CSH ocupadas pelos metais pesados.

| Posições potenciais   | Metal Pesado                     | Objetivo   | Conclusão  |
|-----------------------|----------------------------------|--|--|
| <b>POSIÇÃO 1</b>      | Pb (ROSE <i>et al.</i> , 2000)   | Investigando os locais de retenção de Pb durante a hidratação do silicato tricálcico                           | Em baixa concentração, o Pb foi quimicamente fixado no CSH. O ambiente atômico de Pb indicou que o Pb foi ligado a uma cadeia de silicatos tetraedros de CSH pela ligação Pb-O-Si.                         |
| <b>POSIÇÃO 1</b>      | Zn (ROSE <i>et al.</i> , 2001)   | Estudando as interações entre o zinco e a matriz de cimento elucidando os mecanismos de ligação do Zn pela CSH | Na baixa concentração de Zn, o Zn não retardou a hidratação do C <sub>3</sub> S. O ambiente atômico do Zn indicou que o Zn estava ligado a uma cadeia de silicatos tetraedros de CSH pela ligação Zn-O-Si. |
| <b>POSIÇÃO 2</b>      | Zn (STUMM <i>et al.</i> , 2005 ) | Investigando a incorporação de zinco em hidratos de silicato de cálcio   | Pb poderia ser incorporado na camada intermediária de CSH (I) e na folha X de girolita (uma contraparte isoquímica de CSH (I)).  |
| <b>POSIÇÃO 1 OU 3</b> | Zn(TOMAS EO; KERSTEN, 2002 )     | Investigando o local ocupado pelo zinco na estrutura da CSH  | O tetraedro de Zn (O, OH) <sub>4</sub> foi incorporado nas posições de camada de CSH e substituído pelo tetraedro de ponte de silicato e / ou ligado nos locais da cadeia de silicato terminal.            |

Fonte: VESPA *et al.* (2014).

Para demonstrar melhor como acontece a retenção de alguns metais pesados utilizando a E/S, na Figura 3 tem-se a ilustração originada do trabalho de CONNER (1990), no qual ele realizou o tratamento de Resíduos Sólidos Industriais perigosos com pozolanas, cinzas volantes e cimento, demonstrando como acontece a conversão e o aprisionamento dos contaminantes.

Figura 3 - Hidratação do cimento e o aprisionamento de contaminantes.



Fonte: CONNER (1990).

A Figura 3 demonstra como acontece a E/S, pois os contaminantes se encontram retidos ou aprisionados no interior da matriz cimentícia. Isso ocorre devido a reações químicas entre os contaminantes e aglomerantes e/ou processos por meio da retenção física dos metais pesados (BRITO, 2007).

Pode-se observar que chumbo ( $Pb^{2+}$ ), cádmio ( $Cd^{2+}$ ) e zinco ( $Zn^{2+}$ ) foram precipitados na zona de superfície do composto hidratado, enquanto que o cromo ( $Cr^{3+}$ ) foi incorporado no interior da matriz, principalmente no interior do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o qual apresenta a fórmula molecular  $CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ . Os íons de cádmio ( $Cd^{2+}$ ) e zinco ( $Zn^{2+}$ ) se encontram precipitados na matriz, reagindo com a portlandita  $Ca(OH)_2$ , resultando na substituição dos íons ( $Cd^{2+}$ ) e ( $Zn^{2+}$ ) por um duplo composto de  $CdCa(OH)_4$  e  $CaZn_2(OH)_5 \cdot 2H_2O$ . Já o óxido de mercúrio e os sais de Bário permanecem na superfície da matriz, pois com o aumento do pH os cátions de bário ( $Ba^{+2}$ ) e mercúrio ( $Hg^{2+}$ ) são convertidos em óxido ( $HgO$ ) e carbonatos insolúveis ( $BaSO_4$  e  $BaCO_3$ ) (CONNER, 1990).

Diante disso, é possível afirmar que a tecnologia de solidificação do cimento e os agentes estabilizantes para solidificar os metais pesados se apresentam como uma excelente alternativa devido seu alto desempenho de solidificação do cimento para tratamento dos metais pesados.

### 2.3 ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO DE CONTAMINANTES

Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), a tecnologia de estabilização por solidificação (E/S), é considerada como o método mais eficaz para o tratamento de resíduos perigosos. Essa técnica consiste na redução da mobilidade e toxicidade de metais pesados. O Cimento Portland Comum é o material mais utilizado e estudado em nível mundial para o tratamento de resíduos contendo metais pesados (HUANG *et al.* 2017).

O termo “metais pesados ou metais tóxicos” refere-se aos metais e metalóides, que têm a capacidade de causar uma série de danos ao meio ambiente como poluição e toxicidade. São considerados como metais pesados aqueles que possuem massa específica superior a  $5 \text{ g.cm}^{-3}$ , como por exemplo, mercúrio ( $\text{Hg}^{2+}$ ), chumbo ( $\text{Pb}^{2+}$ ), cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ), cádmio ( $\text{Cd}^{2+}$ ) e zinco ( $\text{Zn}^{2+}$ ), que descartados de forma incorreta causam sérios problemas devido à sua periculosidade (ALAHVERDI ; SAVABIEASF AHANI, 2012).

Existem várias atividades que durante seu processamento produzem enormes quantidades de metais pesados, dentre elas as atividades realizadas em laboratório, principalmente de química, onde grandes quantidades de metais são geradas. Por isso, é necessário realizar o tratamento prévio desses contaminantes antes do descarte final com o intuito de evitar a poluição e contaminação da área que o metal for exposto (LIMA, 2018).

O corpo humano também necessita de alguns desses elementos químicos para seu funcionamento, porém em baixas concentrações, como o cobalto, cobre, manganês, selênio e zinco. Na Tabela 4 estão descritos os metais essenciais para o funcionamento do corpo humano e suas respectivas concentrações, (SILVA,2014).

Tabela 4- Metais essenciais no organismo humano.

| <b>Metal</b> | <b>% (kg/kg)</b> |
|--------------|------------------|
| Cálcio       | 1,6              |
| Potássio     | 0,2              |
| Sódio        | 0,1              |
| Magnésio     | 0,05             |
| Ferro        | <0,05            |
| Cobalto      | <0,005           |
| Cobre        | <0,05            |
| Zinco        | <0,05            |
| Selênio      | <0,01            |

Fonte: Adaptado de SILVA (2014).

Como pode ser observado na Tabela 4, esses elementos devem estar em concentrações baixas para não causarem problemas à saúde humana, pois o aumento dessas concentrações ao longo do tempo, favorece o surgimento de vários efeitos tóxicos. Porém, quando o corpo humano entra em contato com os metais não-essenciais, aqueles que não apresentam nenhuma função benéfica para o corpo, esses metais originam sérios problemas como: Efeitos cancerígenos; toxicidade; alteração do Sistema Imunitário e Neurológico (NWOKACHA, 2012).

## 2.4 ESTADO DA ARTE

Pinto *et al.* (2010) avaliaram o processo de E/S utilizando cimento Portland no tratamento de resíduo contendo cromo. A partir das análises foi observado que a presença do resíduo diminuiu a resistência à compressão, onde todas as matrizes cimentícias contendo o contaminante atingiram uma resistência mínima de 0,34 MPa. Levando em consideração o Protocolo utilizado no processo de E/S no Canadá, as matrizes atenderam o valor necessário para validação do processo.

Desogus *et al.* (2013), estudaram a E/S utilizando cimento com adição de Di-hidrogenofosfato de Potássio ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) no tratamento de Pb e Zn com diferenças de pH. Para realizar o experimento, foram moldados corpos de provas com diferentes concentrações de resíduo, mantendo por um tempo de cura de 28 dias. Em seguida foi realizado testes de lixiviação, observando que a utilização combinada dos aditivos (1%  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  e 1%  $\text{FeCl}_3$ ), juntamente com pequenas quantidades de cimento, transformou o material perigoso em um material inerte devido o encapsulamento físico e formação de compostos estáveis, demonstrando a eficiência da técnica no tratamento de resíduos contendo Chumbo e Zinco.

Sobiecka *et al.* (2014), utilizaram a E/S com Cimento Portland no tratamento de cinzas da incineração de resíduos sólidos hospitalares, contendo  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  e  $\text{Ni}^{2+}$ . Para realizar o experimento foram moldadas cinco matrizes de cimento com 10%, 20%, 40%, 50% e 60% de cinzas contendo metal pesado em seguida sendo feita a hidratação do cimento e granulação. A partir das análises foi possível observar que quanto maior a carga de cinzas nas misturas, maior a concentração de  $\text{Zn}^{2+}$  e  $\text{Cd}^{2+}$  no lixiviado, enquanto que o oposto foi obtido para o restante dos metais pesados, além de obter um pH entre 7 e 8 em todos lixiviados, demonstrando que a hidratação de cimento reduziu a periculosidade do resíduo.

Chaabane *et al.* (2017), estudaram a E/S utilizando Cimento Portland Comum com diferentes percentuais de resíduo gerados pela indústria de talheres (10, 20, 25, 30 e 45%) contendo  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$  e  $\text{Cr}^{+3}$ . Para realizar o experimento, misturaram cimento, resíduo, areia e água desmineralizada, em forma de blocos, mantendo por 28 dias de tempo de cura. Em seguida, foram realizados Testes de Resistência Mecânica, Difração de Raios X (DRX), Micro-análise de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX), Lixiviação, Ensaio de Poros e Máximo de Fração Móvel e Capacidade de Absorção de água. Com base nas análises realizadas os corpos de prova com 30% de resíduo apresentaram melhores resultados, pois foi alcançado uma boa estabilidade química e física no tratamento do resíduo.

Li e Poon (2017), Utilizaram a E/S a base de Cimento Portland Comum (CPC) no tratamento de solos contaminados com chumbo (Pb) e cinzas de lodo de esgoto

incinerado (ISSA). Para realizar o experimento, foram moldados corpos de provas com CPC e CPC misturado com cinzas de lodo de esgoto incinerado (ISSA) com diferentes concentrações de Pb, mantendo por um período de cura de 7 e 28 dias. Após esse tempo, foram realizados testes de resistência, lixiviação e microscopia. Os resultados mostraram que a substituição do OPC pelo ISSA reduziu significativamente a resistência e a quantidade de Pb lixiviado. Além disso, a lixiviação do Pb foi controlada pelo efeito combinado de adsorção, encapsulação ou precipitação nos solos E/S, resultando em uma redução significativa do poluente presente no solo.

Slorgon *et al.* (2017), Utilizaram a E/S a base de cimento no tratamento de resíduo sólido industrial de galvanoplastia visando sua reutilização na fabricação de blocos de concretos para pavimentação. Para realizar o experimento foram moldados blocos com percentuais de 0%, 2%, 3%, 4%, 5% e 10% de resíduo, na massa de concreto. Após o tempo de cura, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência a compressão, absorção de água, lixiviação e solubilização. Com base nas análises, foi observado que o resíduo foi classificado como não perigoso, não inerte (Classe IIA), e que substituições de até 10% de areia por resíduo não resultaram em perdas expressivas na resistência à compressão ou no aumento da absorção de água dos blocos, concluindo que o material tratado por E/S pode ser utilizado na confecção de blocos de concreto para pavimentação, sem causar danos ao meio ambiente.

Sousa (2017), avaliou os critérios de integridade e durabilidade de matrizes cimentícias com concentrações de 10 e 30% de Resíduo Sólido de Laboratório, com um tempo de cura variando de 7 e 28 dias. No ensaio de umidificação e secagem foi observado que todas as matrizes apresentaram boa durabilidade, pois, houve pequena perda de massa nos corpos de prova, principalmente as matrizes formadas pelos pontos centrais que tiveram menos de 1% de perda de massa. Já no ensaio de Capacidade de absorção de água, os corpos de prova com 30% de RSL em sua composição e tempo de cura de 28 dias apresentaram os melhores resultados, comprovando a eficiência da E/S para as devidas condições realizadas.

Lima (2018) utilizou a técnica de E/S no tratamento do resíduo sólido de laboratório (RSL) contendo zinco e cobre, com um percentual de 5 e 15% de RSL e tempo de cura de 7 e 28 dias. A autora avaliou o material E/S, a partir de ensaios de integridade e durabilidade e imobilização dos contaminantes. Os resultados desse estudo, evidenciou que todos os tratamentos foram aprovados nos ensaios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes, reduzindo sua periculosidade, transformando em um material não perigoso principalmente quando foi utilizado menor porcentagem de RSL e menor tempo de cura.

Wang *et al.* (2018), realizaram a E/S para observar o comportamento do chumbo durante o processo de hidratação do cimento Portland comum. Foram realizadas as análises de resistência a compressão e tempo de endurecimento do cimento. A partir dos resultados obtidos foi observado que a presença de Pb influenciou na diminuição da resistência à compressão em 30,4% e o tempo de endurecimento final foi prolongado em 334,7%. Segundo os autores, esses resultados são atribuídos à taxa de reação de hidratação retardada do CPC durante o período de indução, evidenciando que a E/S do Pb solúvel à base de CPC depende principalmente do encapsulamento físico pelo hidrato de silicato de cálcio (C-S-H).

Paixão (2019), Utilizou a técnica de E/S no tratamento de Resíduo Sólido de Laboratório (RSL) para analisar os materiais E/S quanto à integridade/durabilidade, imobilização e determinar o coeficiente de difusão do Cromo. Para realizar os experimentos foram moldados corpos de prova com diferentes concentrações de RSL, mantendo por um período de cura de 28 dias. Após esse período, foram realizados ensaios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes, análise estatística e determinação do coeficiente de difusão modificado do cromo e o mecanismo de lixiviação. Após as análises foi observado que as matrizes com até 10% de RSL passaram de resíduos classe I (perigosos) para resíduos classe IIA (não perigoso, não inerte), enquanto que o de 20% de RSL permaneceu como classe I, comprovando a eficiência da técnica no tratamento de resíduos contendo metais pesados, devido à redução de sua periculosidade.

Contessi *et al.* (2020), estudaram a E/S no tratamento de solos contaminados com chumbo utilizando cimento de aluminato de cálcio (CAC) com ligante de metacaulim alcalino ativado e o cimento Portland comum (OPC). Foram realizados ensaios de lixiviação para verificar a eficácia dos ligantes propostos na E/S do solo contaminado e a liberação de Pb foi avaliada para cada sistema de ligação. Com base nas análises foi observado que o Pb estava associado à C-S-H no caso do CPC, enquanto a etringita desempenhou um papel fundamental na retenção do Pb usando o aglutinante CAC. Também foi observado que o uso de um metacaulim ativado por NaOH resultou em uma elevada retenção de Pb, apesar da falta de solidificação, comprovando bons resultados na aplicação da E/S.

Wang *et al.* (2020), Aplicaram a E/S no tratamento de solo contaminado por Pb e Zn, utilizando GGBS (escória granulada de alto-forno moído) -MgO-CaO (GMCs) com diferentes concentrações (5% a 15%), tempo de cura (7 dias e 28 dias) e temperatura (5°C, 21°C e 45°C). Nesse estudo foi investigado as características físicas e microestruturais do solo, descobrindo que os principais produtos de hidratação do solo contaminado tratado com GMC eram C-S-H e geles de hidrotalcita (Ht). Além disso, foi realizada análise de Resistência a Compressão e

lixiviação. A partir das análises foi possível observar que a RC da maioria das misturas atendeu ao critério da EPA (0,35 MPa). De acordo com os resultados de DRX e SEM, tanto o Pb quanto o Zn no solo podem ser imobilizados pela precipitação e adsorção na superfície do hidrato de silicato de cálcio (C – S – H), evidenciando a eficiência da técnica no tratamento de metais pesados.

Diante disto, é possível constatar a eficácia e praticidade do processo de Estabilização por Solidificação, utilizando o Cimento Portland como aglomerante, no tratamento e imobilização de metais pesados presente em resíduos perigosos, possibilitando a redução de sua periculosidade e sua reutilização em outras finalidades.

### 3 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos da UFCG (UAEQ). A pesquisa foi dividida em 05 etapas, assim discriminadas:

- 1ª Etapa: Planejamento do experimento
- 2ª Etapa: Classificação e caracterização dos materiais
- 3ª Etapa: Confeccção dos corpos de provas
- 4ª Etapa: Realização dos experimentos
- 5ª Etapa: Análise estatística dos dados experimentais

#### 3.1 ETAPA I: PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Foi adotado o planejamento fatorial  $2^k$  com adição de 3 repetições no ponto central (PtCt), em que o ponto central é a média aritmética dos níveis nos fatores,  $k$  representa o número de fatores e 2 representa o número de níveis. A adição do ponto central (PtCt) permitiu avaliar a variância do erro experimental quando experimentos não replicados nos pontos fatoriais forem realizados. Os fatores adotados serão: temperatura de cura e percentual de resíduo sólido de laboratório (RSL).

Para o fator temperatura de cura, foram usados os níveis 6°C e 50°C codificados como (-1) e (+1), para níveis baixos e altos, respectivamente. Para o fator porcentagem de RSL, foram usados os níveis 10% e 45%, codificados nos níveis baixos (-1) e alto (+1), respectivamente.

Na Tabela 5 estão apresentados os níveis dos fatores e os pontos centrais (0).

Tabela 5 - Níveis dos fatores do processo de estabilização por solidificação.

| Fatores   | Nível baixo (-) | Ponto Central (0) | Nível Alto (+) |
|---|-----------------|-------------------|----------------|
| Temperatura da cura (°C)                        | 6               | 28                | 50             |
| Percentual de resíduo sólido de laboratório (%) | 10              | 27,5              | 45             |

Fonte: Dados da pesquisa, (2021).

O número total de ensaios com o planejamento fatorial  $2^k$ , com adição de 3 repetições no ponto central (PtCt) é dado pela Equação 1:

$$n = 2^k + m \quad (1)$$

Em que:

$2^k$ : número de pontos fatoriais (4 pontos)

$m$ : número de replicações do ponto central (3 pontos)

Visto que o planejamento foi composto por 2 fatores (concentração e temperatura) e 03 pontos centrais, foram realizados 7 experimentos. Na Tabela 6 é apresentada a matriz de planejamento

Tabela 6- Matriz de planejamento fatorial com adição de três pontos centrais.

| Experimento      | Fator codificado Temperatura de Cura | Fator codificado Porcentagem de RSL | Valor Real da Temperatura de Cura(°C) | Valor Real da Porcentagem de RSL(%) | Variável Resposta (VR) |
|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| Exp <sub>1</sub> | -1                                   | -1                                  | 6                                     | 10                                  | Y <sub>1</sub>         |
| Exp <sub>2</sub> | +1                                   | -1                                  | 50                                    | 10                                  | Y <sub>2</sub>         |
| Exp <sub>3</sub> | -1                                   | +1                                  | 6                                     | 45                                  | Y <sub>3</sub>         |
| Exp <sub>4</sub> | +1                                   | +1                                  | 50                                    | 45                                  | Y <sub>4</sub>         |
| Exp <sub>5</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | Y <sub>5</sub>         |
| Exp <sub>6</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | Y <sub>6</sub>         |
| Exp <sub>7</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | Y <sub>7</sub>         |

LEGENDA - VR: Variável resposta; y:Resposta do experimento; RSL: Resíduo Sólido de Laboratório

Fonte: Dados da pesquisa, (2021).

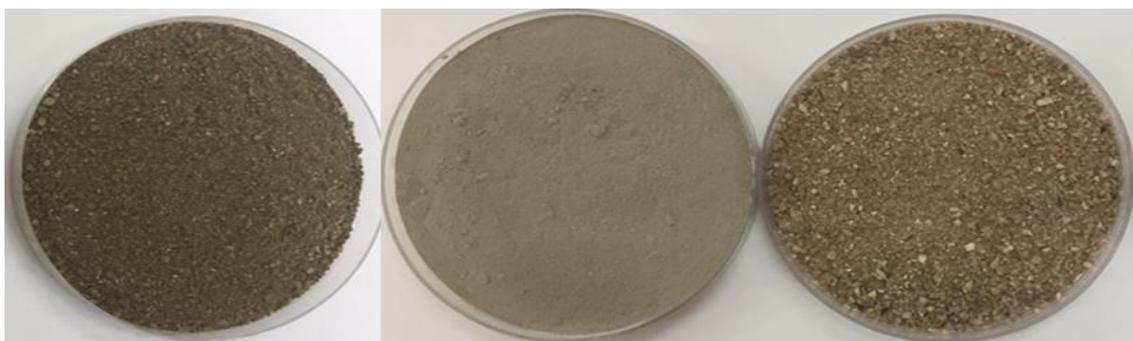
### 3.2 ETAPA II: CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O aglomerante utilizado no processo de E/S de Resíduo Sólido de Laboratório foi o cimento Portland CII-Z-32 da marca Montes Claros. O Cimento Portland CP II-Z-32 é um aglomerante hidráulico obtido a partir da moagem do clínquer Portland ao qual é adicionado, durante a operação, uma quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitida adicionar em sua composição 6 a 14% de pozolana e até 10% de material carbonático. A sigla Z-32 significa a presença de pozolana no cimento, apresentando uma resistência à compressão de  $\geq 32,0$ MPa aos 28 dias de cura, o que confere ao cimento menor permeabilidade (ABNT NBR 11578, 1991).

A areia, utilizada como agregado miúdo na confecção dos corpos de prova, foi obtida no comércio da cidade de Campina Grande-PB, sendo realizado seu peneiramento com granulometria numa faixa de 0,075 mm a 4,8 mm de diâmetro.

O Resíduo Sólido de Laboratório (RSL) utilizado na execução dos experimentos laboratoriais dessa pesquisa foi coletado dos Laboratórios de Química Analítica, pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ), do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Câmpus sede localizado na cidade de Campina Grande-PB.

Figura 4- Aglomerantes utilizados para confeccionar os corpos de prova.



a) Resíduo Sólido de Laboratório; b) Cimento Portland II - Z 32; c) Areia.

Fonte: Próprio autor, (2021).

A classificação dos materiais foi realizada seguindo o procedimento descrito pela NBR 10.004 (ABNT NBR 10.004, 2004). Para isto foram realizados ensaios de lixiviação no cimento, areia e no RSL.

A caracterização do cimento, areia e do RSL, foi realizada por meio de Análises Físicas (Determinação dos Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV), Sólidos Totais Fixos (STF) e Umidade (%H<sub>2</sub>O) e Análises Químicas (pH e metais) as quais estão descritas nos tópicos a seguir.

### 3.2.1. Análises Físicas

#### a) Teor de umidade

O teor de umidade representa a quantidade de água contida no resíduo. Para realizar esta análise foi utilizado o método gravimétrico segundo o procedimento descrito no *Standard methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2005). Foram pesados 05 gramas do material e colocados em uma estufa a 105 °C durante 24 horas. Em seguida, este material foi colocado em dessecador até atingir temperatura ambiente, em seguida, foi pesado. A umidade percentual foi determinada pela diferença de peso, conforme apresentado na Equação 2.

$$\text{Umidade (\%)} = 100 - \text{ST} \quad (2)$$

### b) Sólidos e suas frações

A determinação dos sólidos totais, fixos e voláteis permitiu verificar o teor de matéria orgânica presente no resíduo, bem como os elementos que não se volatilizam à temperatura de 550°C. Utilizou-se o método gravimétrico Standard Methods (2005), realizando os seguintes passos: Inseriu cápsulas de porcelana limpas no forno mufla por 1 hora, para eliminação total da umidade; Colocou no dessecador até uniformizar a temperatura; Pesou as cápsulas na balança; Adicionou 05 gramas de resíduo em cada uma delas; Deixou secar em estufa por 24 horas à temperatura de 103-105°C; Retornou o resíduo ao dessecador até esfriar; Pesou novamente; Levou o resíduo para incinerar à temperatura de 550°C no forno mufla por 1 hora; Esfriou a amostra no dessecador, e pesou novamente, calculando o resultado a partir das seguintes expressões:

$$SólidosTotais(\%) = \left[ \frac{(A - B)}{(C - B)} \right] * 100 \quad (3)$$

$$SólidosVoláteis(\%) = \left[ \frac{(A - D)}{(A - B)} \right] * 100 \quad (4)$$

$$SólidosFixos(\%) = \left[ \frac{(D - B)}{(A - B)} \right] * 100 \quad (5)$$

Em que:

A : peso da amostra seca + cápsula

B : peso da cápsula

C : peso da amostra úmida + cápsula

D : peso do resíduo calcinado + cápsula

### 3.2.2. Análise Química

#### Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH é um parâmetro utilizado para expressar o grau de basicidade ou acidez de uma amostra. A análise do pH foi realizada a partir de um material colhido recentemente e com sua

umidade natural. O pH das amostras foi determinado com potenciômetro em suspensão aquosa de acordo com as recomendações propostas pelo *Standard methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2005).

1. Adicionar em um Becker 500 mL de água destilada;
2. Ferver a água e deixar em repouso até esfriar para eliminar o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).
3. Em seguida pesar 05g de amostra;
4. Adicionar a amostra em 50 mL de água isenta de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), fervida anteriormente na proporção (1:10);
5. Deixar em repouso por 24 horas, em seguida, fazer as leituras de pH, em duplicata, com o auxílio de um pHmetro modelo DM-22, marca DIGIMED.

Figura 5- pHmetro utilizado para realizar a leituras das amostras.



Fonte: Próprio autor,(2021).

### 3.3 ETAPA III: PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para avaliação da técnica de estabilização por solidificação foram confeccionados corpos de prova utilizando Cimento Portland CP II-Z-32 (aglomerante), areia (agregado miúdo), água e o RSL. A proporção de cada componente foi calculada admitindo um traço de 1:5, ou seja, uma parte de cimento e 5 partes dos outros componentes.

A moldagem das matrizes cimentícias foi realizada respeitando os aspectos operacionais estabelecidos por Brito (2007), no Protocolo de Avaliação de Materiais Estabilizados por Solidificação. A Tabela 7 apresenta os aspectos operacionais e seus respectivos parâmetros necessários para realizar os experimentos laboratoriais.

Tabela 7- Aspectos operacionais para preparação das matrizes cimentícias.

| 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 |
| Material do molde                | Aço inoxidável                     |
| Tempo de moldagem                | 24 horas                           |
| Umidade relativa do laboratório  | 50 a 100 %                         |
| Temperatura do laboratório       | 24 ± 4 °C                          |

Fonte: BRITO (2007).

Seguindo as condições estabelecidas na Tabela 8, os corpos de provas foram confeccionados conforme as etapas a seguir definidas por Brito (2007):

Definido o traço de 1:5 para corpos de provas com 450 g, pesou os aglomerantes, cimento, areia e o resíduo sólido de Laboratório separadamente em uma balança analítica com precisão de 0,01 g.

Colocou os materiais pesados em uma cuba e misturou com velocidade baixa por dois minutos, registrando a hora em que os aglomerantes foram postos em contato com a água de mistura para iniciar a contagem do tempo de preparação dos corpos de provas.

Colocou as composições misturadas no interior dos moldes cilíndricos e deixaram em repouso por um período de 24 horas para endurecimento da pasta.

Colocou placas de vidros retangulares de 70 mm por 100 mm de aresta com 5 mm de espessura para evitar perda de água.

Após período de 24 horas retirou os corpos de provas do interior do molde e deixá-los em repouso por um período pré-estabelecido de tempo de cura de 28 dias.

Após o tempo de cura realizou os ensaios referentes aos critérios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes.

Os corpos de prova tiveram porcentagem inicial de RSL de 10%, 27,5% e 45%. A Tabela 8 apresenta as massas do RSL, cimento e aglomerantes para preparação dos corpos de prova.

Tabela 8- Composição da matriz cimentícia dos corpos de prova.

| % RSL | CPC | AGLOMERANTES (g) |       | CORPOS<br>DE PROVA (g) |
|-------|-----|------------------|-------|------------------------|
|       |     | RSL              | AREIA |                        |
| 10%   | 75  | 7,5              | 367,5 | 450                    |
| 27,5% | 75  | 20,6             | 354,4 | 450                    |
| 45%   | 75  | 33,8             | 341,3 | 450                    |

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

Fonte: Próprio autor, (2021).

A confecção dos corpos de prova com 450g, teve o traço de uma parte de cimento para 5 de agregados de acordo com a porcentagem de resíduo, e a relação água cimento de 1:0,55. A seguir tem-se um exemplo de como as massas de cada componente foram encontradas:

#### **Memorial de cálculos para 10% de RSL:**

Visto que o traço é de um para cinco (1:5), ou seja, uma parte de cimento para cinco partes de aglomerantes, toda mistura envolvida na confecção do corpo de prova é formada por 6 partes. Sabendo que a capacidade máxima da mistura nos moldes é de 450g, tem-se que:

- Massa do cimento (CPC): Massa do Corpo de prova (CP)/6  
 $450\text{g}/6 = 75\text{g}$

Massa do CPC = 75g de cimento (significa dizer que temos uma parte de cimento para cinco partes do restante da massa total).

O RSL reage apenas com o cimento, assim a massa de RSL a ser adicionada é dada pelo percentual desejado multiplicado pela massa de cimento (mCPC).

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

$$\text{Massa do RSL} = 75 \times 0,1$$

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

A areia é o agregado miúdo sendo utilizado para completar a massa restante para atingir a capacidade máxima da mistura nos moldes de 450g, logo:

- Massa de areia (mA) = mCP- mCPC – mRSL

$$\text{Massa de areia} = 450 - 75 - 7,5$$

$$\text{Massa de areia} = 367,5 \text{ g de areia.}$$

Dessa forma temos que para 10% de RSL o corpo de prova foi composto por 75g de cimento, 7,5g de RSL e 367,5g de areia totalizando 450g. Para a confecção dos outros corpos

de prova foram utilizados o mesmo raciocínio, mudando apenas a porcentagem de RSL (27,5% e 45%) na formulação dos cálculos.

Figura 6- Corpos de Prova confeccionados.



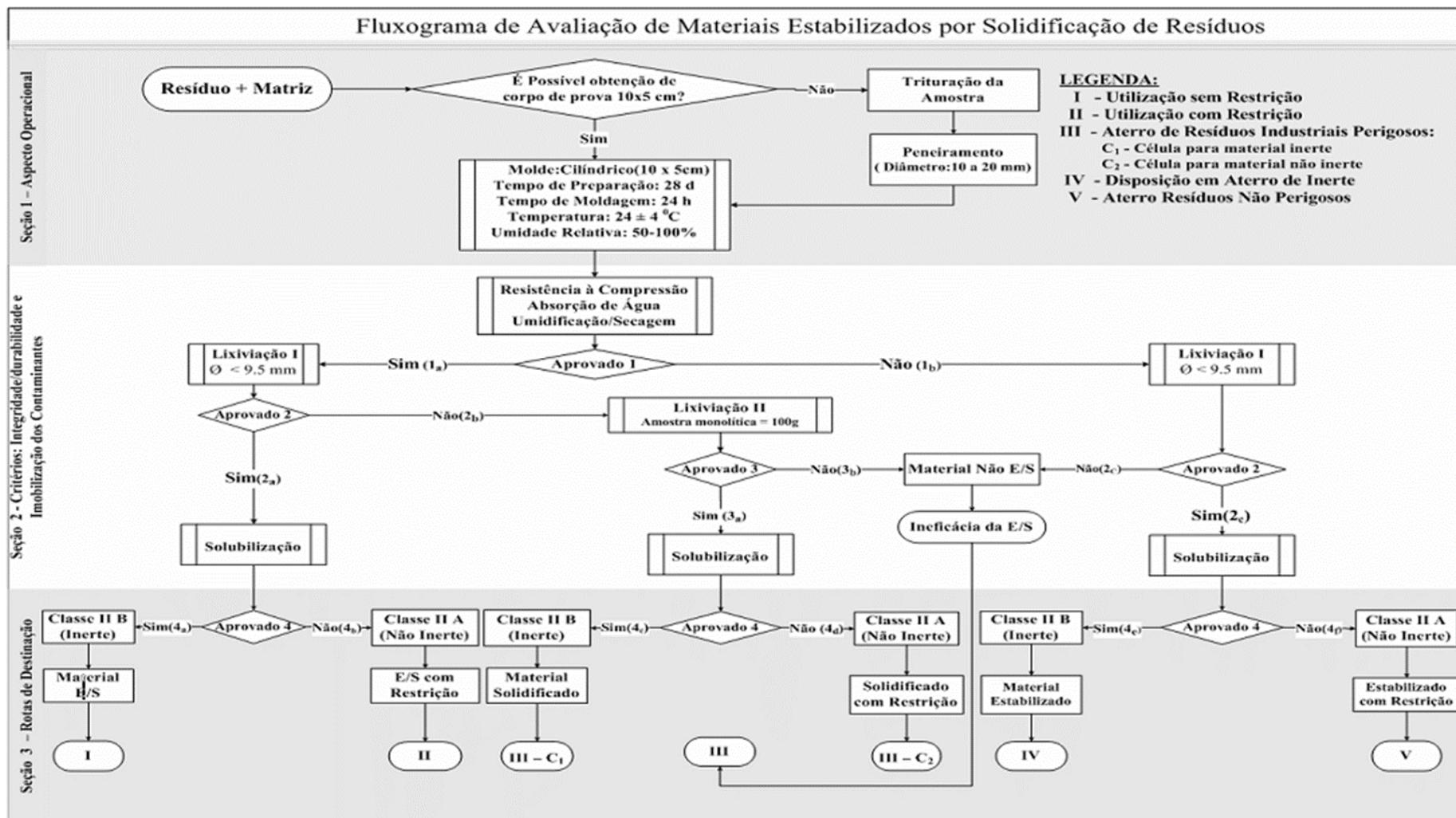
Fonte: Próprio autor, (2021).

### **3.4 ETAPA IV: ENSAIO DE INTEGRIDADE/DURABILIDADE E IMOBILIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES**

Para avaliar os materiais Estabilizados por Solidificação nesse trabalho, foi utilizado o Protocolo de Avaliação de Materiais E/S proposto por BRITO (2007). O Protocolo funciona como uma ferramenta para avaliar a integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes (Figura 7), além de mostrar as rotas de disposição dos resíduos tratados por E/S.

Dessa forma, foram realizados os ensaios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes. As análises realizadas para verificar a integridade/durabilidade foram: Umidificação e secagem (U/S), capacidade de absorção de água (CAA) e resistência à compressão (RC). E para avaliar a imobilização dos contaminantes foram realizados os ensaios de lixiviação e DQO. Além disso, também foram realizadas outras análises físico e químicas como Umidade, Sólidos Totais, Fixos e Voláteis, pH.

Figura 7- Fluxograma de Avaliação de Materiais Estabilizados por Solidificação de Resíduos



Fonte: BRITO (2007).

De acordo com o protocolo de avaliação de Brito (2007), o material E/S pode ter a seguinte destinação:

- **Utilização sem restrição:** Quando o material é aprovado nos critérios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes é considerado adequado, ambientalmente, para diversos usos como, por exemplo, material de construção ou como material de base e cobertura em obras de pavimentação.
- **Utilização com restrição:** Quando o material é aprovado nos critérios de integridade/durabilidade e no ensaio de lixiviação, porém, reprovado no ensaio de solubilização, este é classificado como estabilizado e solidificado com restrição. O armazenamento deste tipo de material deve ser realizado conforme a ABNT NBR 11.174 (1990) ou utilizado com restrição.
- **Disposição em aterro de resíduos industriais perigosos:** Quando o resíduo E/S é aprovado no critério de integridade/durabilidade e reprovado nos ensaios de lixiviação, ou, reprovado no critério de integridade/durabilidade e reprovado no ensaio de lixiviação este deverá ser disposto em aterro de resíduos industriais perigosos. De acordo com a ABNT NBR 10.157 (1987) os resíduos perigosos e com características tóxicas devem ser dispostos em células especiais de disposição para proteger as áreas próximas ao local de disposição.
- **Disposição em aterro de materiais inertes:** Quando o resíduo é reprovado no critério de integridade/durabilidade, mas aprovado nos critérios de imobilização dos contaminantes, o material será denominado como estabilizado e conforme a ABNT NBR 15.113 (2004) e poderá ser encaminhado para aterro de materiais inertes.
- **Disposição em aterro de resíduos não perigosos:** Quando o material E/S for reprovado nos critérios de integridade/durabilidade, aprovado no ensaio de lixiviação e reprovado no ensaio de solubilização, este será denominado estabilizado com restrição, e, de acordo com a ABNT NBR 8.419 (1992) e a ABNT NBR 13.896 (1997) deverá ser disposto em aterro de resíduos não perigosos, que é um local que assegura a proteção adequada ao meio superficial e subterrâneo.

#### 3.4.1 Umidificação e secagem

O ensaio de umidificação/secagem aplicado no procedimento de E/S consiste em simular e avaliar a capacidade do material (corpo de prova) exposto a variações de estado, ou seja, o material foi colocado em um recipiente e umidificado com água a  $22 \pm 3$  °C. Em seguida, foi realizada a secagem com auxílio de estufa a  $105 \pm 5$  °C, visando avaliar a durabilidade a longo

prazo e a perda de massa após sucessivos períodos de umidificação/secagem. Neste caso, a amostra é umidificada com água e posteriormente submetida à secagem por três ciclos sendo 24 horas cada ciclo. Ao término do último ciclo foi realizado o cálculo da Equação 6 para observar o percentual que foi degradado ao longo do teste.

$$PP (\%) = \frac{P_{nat} - P_{ciclo\ i}}{P_{nat}} \times 100 \quad (6)$$

Em que :

PP = Perda de Peso

P<sub>nat</sub> = Peso da amostra natural

P<sub>ciclo i</sub> = Peso da amostra após cada ciclo de umidificação/secagem

A seguir tem-se a Figura 8 ilustrando o procedimento realizado conforme descrito anteriormente.

Figura 8- Realização do ensaio de Umidificação/Secagem.



(A)

(B)

(A) Estufa utilizada no ensaio de U/S. (B) Ensaio de U/S.

Fonte: Próprio autor, (2021).

### 3.4.2 Capacidade de Absorção de Água

O ensaio de capacidade e absorção de água foi realizado conforme ABNT (1987) - NBR 9778: “Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica”, que avalia a porosidade do material endurecido ou E/S. A Figura 9 ilustra os corpos de prova durante o teste de capacidade de absorção de água.

Figura 9- Ensaio de Capacidade de absorção de água.



Fonte: Próprio autor, (2021).

A análise recomenda que se trabalhe com corpos de provas condicionados na mesma faixa de temperatura. Com isso, os corpos de provas foram deixados em um recipiente em temperatura ambiente até que todos estivessem em temperatura uniforme. Posteriormente as amostras foram imersas em água a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  por 72 horas. Ao completar esse tempo, a amostra foi colocada em um recipiente cheio d'água por cinco horas, foi levado progressivamente à ebulição, aumentando a temperatura em  $10^{\circ}\text{C}$  numa faixa de  $60^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ , mantendo por 1 hora cada faixa de temperatura. A ebulição foi mantida por um período de 5 horas, preservando aproximadamente constante o volume da água. Em seguida retiraram-se as amostras da placa aquecedora, as quais foram secas com papel absorvente e deixarem esfriarem pela perda natural de calor até  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  realizando-se, em seguida, a pesagem das amostras.

O resultado do ensaio é expresso em % conforme a Equação 7 conhecendo-se a massa do corpo de prova após saturação em água e a massa do corpo de prova seco.

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

Em que :

CAA: Capacidade de absorção de água

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

Ms : massa do corpo de prova seco.

### 3.4.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão (RC) foi realizado para verificar a resistência do material E/S quando o mesmo é exposto a diferentes cargas de compressão mecânica. Os testes de RC foram realizados de acordo com a ABNT NBR 7215 (1996). Para realizar este ensaio

foram utilizadas matrizes cimentícias cilíndricas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, em que as mesmas foram postas diretamente sobre o prato inferior da prensa manual, marca CONTENCO e modelo PAVITEST, ficando centralizadas em relação ao eixo de carregamento. Ao aplicar a carga de compressão sobre a matriz cimentícia foi obtido o valor correspondente à resistência de cada amostra. A medida da resistência à compressão das matrizes cimentícias foi determinada pela Equação 8.

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

Em que:

RC: Resistência a compressão em MPa

F: Força de ruptura dos corpos de prova em kg

Área: Área de seção dos corpos de provas em cm<sup>2</sup>

A Figura 10 mostra o equipamento para realização do procedimento de resistência a compressão.

Figura 10- Equipamento de resistência à compressão.



Fonte: Próprio autor, (2021)

Segundo Brito (2007), baseado na resistência mecânica do material E/S, pode-se estabelecer o destino e finalidade do material como: execução de obras de alvenaria sem função estrutural, material de cobertura, pavimentação em obras de rodovias, uso em cerâmica vermelha (tijolos maciços, blocos cerâmicos e telhas) e fabricação de artefatos de concreto.

#### 3.4.4 Lixiviação

Segundo a ABNT NBR 10004 (2004) a lixiviação é um processo realizado para determinar a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes em um determinado resíduo sólido, por meio de sua dissolução no meio extrator. O ensaio de

lixiviação tem a finalidade de classificar os resíduos como classe I – perigosos e classe II – não perigosos (ABNT NBR 10.004, 2004), seguindo o procedimento descrito na ABNT NBR 10.005 (2004).

Para realizar o ensaio de lixiviação, inicialmente, foram pesadas 100g de cada amostra (base seca), das matrizes cimentícias confeccionadas anteriormente, as quais foram colocadas individualmente em um frasco com capacidade > 2000 mL com a solução lixivante (solução extratora 1 composta por ácido acético glacial, solução de NaOH 1N e água). Em seguida, a solução foi submetida à agitação, em um equipamento rotativo a 30 rpm, Figura 11, sendo a relação líquido-sólido (L/S) de 20:1, permanecendo em agitação por um período de  $18 \pm 2$  horas, ABNT NBR 10.005 (ABNT NBR 10.005, 2004).

Figura 11- Equipamento de Lixiviação



Fonte: Próprio autor, (2021).

Após o tempo de contato do meio lixivante, o mesmo foi filtrado com uma membrana filtrante com porosidade de  $0,45 \mu\text{m}$ , para obter o extrato lixiviado, no qual foi possível determinar o pH e DQO.

Por se tratar de um resíduo sólido é mais apropriado expressar os resultados em  $\text{mg.kg}^{-1}$ , conforme a Equação 9.

$$\text{concentração}(\text{mg.Kg}^{-1}) = \text{concentração}(\text{mg.L}^{-1}) \cdot \frac{\text{Volumedolixiviado (L)}}{\text{Massadaamostra (Kg)}} \quad (9)$$

### 3.4.5 DQO

A avaliação da (DQO) será realizada com o objetivo de determinar o teor de matéria orgânica presentes nas matrizes confeccionadas. O ensaio para determinação de DQO será realizado através das seguintes etapas:

- Diluir a amostra e, em seguida pipetar 1,5 ml da solução digestora num tubo de digestão em seguida adicionar 2,5 ml da amostra e 3,5 da solução catalisadora.

- Preparar a prova em branco com 2,5 ml de água destilada no lugar da amostra;
- Fechar os tubos de ensaio e homogeneizar, colocando para digerir durante 2 horas a  $150^{\circ}\text{C}$ ;
- Preparar a amostra padrão com 1,5 ml da solução digestora mais 1,5 ml de água destilada e 3,5 ml de ácido sulfúrico concentrado;

Figura 12- Ensaio de Digestão das amostras



Fonte: Próprio autor, (2021).

Após a amostra ser digerida por duas horas, é transferido o conteúdo para um erlenmeyer, então é completado com água destilada para um volume de 25 ml e em seguida adicionado uma gota de ferroína a amostra. Em seguida é realizada a titulação com a solução de sulfato ferroso amoniacal.

Figura 13- Amostras após titulação.



Fonte: Próprio autor, (2021).

O valor da concentração de DQO foi obtida através da Equação 10:

$$\text{DQO} \left( \text{mg} \frac{\text{O}_2}{\text{l}} \right) = \frac{(V_{\text{PB}} - V_{\text{PA}}) \times 1000}{V_{\text{P}}} \quad (10)$$

Em que:

VPA: volume da solução ferrosa gasto na titulação da prova que contém a amostra, ml;

VPB: volume da solução ferrosa gasto na titulação da prova padrão, ml.

VP: volume da solução ferrosa gasto na titulação da prova em branco:

#### 3.4.6 Análises físicas e químicas

Assim como nos aglomerantes, também foram realizadas as análises físicas e químicas para caracterizar as matrizes cimentíceas, sendo avaliadas a partir da quantificação das seguintes análises, seguindo o mesmo procedimento utilizado anteriormente na caracterização dos aglomerantes: Umidade; Sólidos Totais; Sólidos Fixos; Sólidos Voláteis (método gravimétrico Standard Methods (2005)) e pH (*Standard methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2005)).

### 3.5 EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DOS CONTAMINANTES

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

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

Em que:

X : Eficiência de retenção (%)

RS: Massa do RSL (kg)

Aglom. : Massa do aglomerante (kg)

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

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

Observação:

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

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

### 3.6 DETERMINAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA DOS CONTAMINANTE

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

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

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

Em que:

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

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

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

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

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

Sendo Z a massa seca dada pela Equação 15:

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

E y% encontrado pela Equação 16 que determina a porcentagem de contaminante:

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

### 3.7 ETAPA V: ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para verificar a validação do modelo, checar as respostas e verificar se existem efeitos significativos entre as respostas médias dos tratamentos, foi realizada a Análise de Variância (Analysis of Variance – ANOVA). A Tabela 9 apresenta a saída do software Minitab para ANOVA (Análise de Variância).

Tabela 9- Análise de variância (ANOVA).

| Fonte de Variação                          | G.l | Soma Quadrática | Quadrado Médio | Valor $p^1$<br>$\epsilon^2$ |
|--|-----|-----------------|----------------|-----------------------------|
| Regressão<br>(Linear/quadrático/interação) | p-1 | SQreg           | SQreg/ p-1     | -                           |
| Resíduo                                    | n-m | SQr             | SQr/n-m        |                             |
| Falta de Ajuste                            | m-p | SQfaj           | SQfaj/m-p      | -                           |
| Erro Puro                                  | n-m | SQep            | SQep/n-m       |                             |
| Total                                      | n-1 | SQt             | SQt/n-1        |                             |
| $R^2_{\text{max}}$                         | R   | $R^2$           |                |                             |

LEGENDA - n: Número (n) de experimentos; p: n. de coeficientes; m: n. de experimentos distintos g.l : Graus de Liberdade; SQ : Soma Quadrática; Valor  $p^1$ : Significativamente diferente ( $p \leq 0,05$ ); Valor  $p^2$  Não significativo ( $p > 0,05$ );  $R^2$ : Coeficiente de determinação;  $R^2_{\text{max}}$ : Porcentagem máxima da variável explicável; R: Coeficiente de correlação entre as variáveis.

Fonte: MONTGOMERY; 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 foram usados para avaliar se existe ou não curvatura (quadrática) na superfície de resposta. Se houver curvatura significa que a resposta não segue um plano, e sim uma curva. Já 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* (variação devido à inadequação do modelo) e puro erro.

### 3.7.1 Coeficiente de Determinação ( $R^2$ )

O coeficiente de determinação foi calculado usando a Equação 17. Ela representa a variação explicável pelo modelo, ou seja, quanto o modelo explica a variação dos dados (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

$$R_{Sq} = R^2 = \frac{SQ_{reg}}{SQ_{total}} \quad (17)$$

Em que:

$SQ_{reg}$ : Soma de quadrado da regressão

$SQ_{total}$ : Somatório de todos os valores observados ao quadrado menos a correção

### 3.7.2 Coeficiente de correlação entre as variáveis (R)

O coeficiente de correlação (R) foi calculado usando a equação  $R = \sqrt{R^2}$ , que representa a correlação entre as variáveis. O valor de R varia entre -1 e 1. O valor -1 indica uma correlação linear negativa e o valor 1 indica uma correlação linear positiva. É um número usado para classificar a correlação da seguinte forma:

- $R=1$  há Correlação Perfeita
- $R > 0,75$  à Forte Correlação
- $0,5 < R < 0,75$  à Média Correlação
- $R < 0,5$  à Fraca Correlação
- $R = 0$  à Inexistente Correlação

### 3.7.3 Porcentagem máxima de variação explicável

A porcentagem máxima de variação explicável foi calculada usando a Equação 18. Ela representa o máximo de variação que o modelo explica. Este valor deve ser comparado com o valor explicado pelo modelo ( $R^2$ ).

$$R_{max}^2 = \frac{SQ_{reg} - SQ_{erro\ puro}}{SQ_{total}} \cdot 100 \quad (18)$$

Em que:

$SQ_{puro\ erro}$ : Diferença entre a soma do quadrado total menos a soma de quadrado do tratamento.

### 3.7.4 Modelo: Planejamento Fatorial Com Adição de Ponto Central

Quando a resposta foi modelada por uma função linear das variáveis independentes, a função de aproximação foi de 1ª ordem (Equação 19):

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (19)$$

Outro objetivo da MSR é determinar as condições de operação ótima para o sistema, ou determinar uma região do espaço dos fatores no qual as especificações (requerimentos) de operação são satisfeitas.

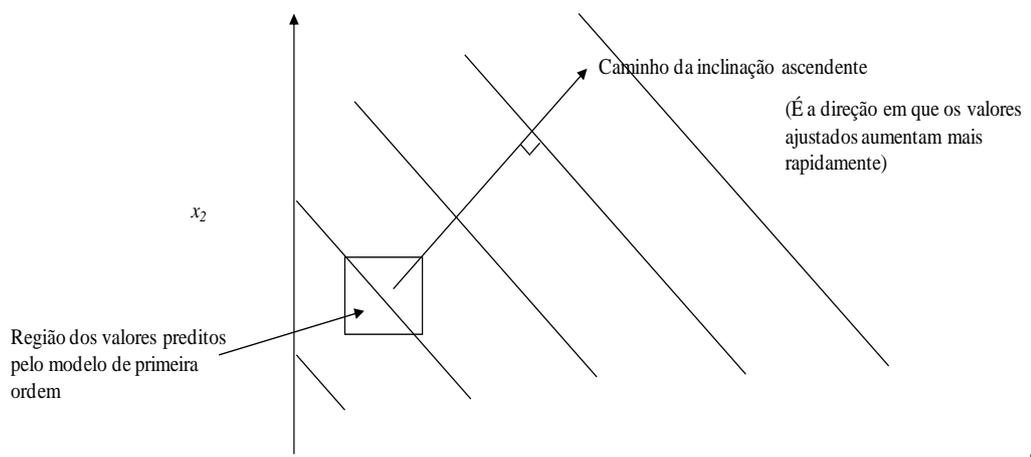
Quando se está distante do ótimo, assume-se um modelo de primeira ordem como aproximação da verdadeira superfície de resposta em uma pequena região das variáveis independentes ( $x_i$ ). O objetivo é mover o experimento rapidamente para a vizinhança geral do ótimo utilizando um procedimento experimental simples, rápido, econômico e eficiente.

- Método de Máxima Inclinação Ascendente (MMIA) procura a MÁXIMA inclinação ascendente
- Método de Mínima Inclinação Descendente (MMID) procura a MÍNIMA inclinação descendente

O gráfico de contornos da superfície resposta de 1ª ordem é uma série de linhas paralelas. A direção da MIA é a direção na qual  $y$  (resposta) estimado cresce mais rapidamente.

Na Tabela 10 tem-se a representação da superfície resposta de primeira ordem e seu respectivo caminho de inclinação.

Tabela 10- Superfície de resposta de primeira ordem e o caminho da inclinação ascendente.



Fonte: Adaptado de WERKEMA; AGUIAR (1996).

Algoritmo geral para determinar as coordenadas de um ponto no caminho da máxima inclinação ascendente:

Assumir que o ponto  $x_1=0, x_2=0, \dots, x_k=0$  é a base ou origem.

1. Escolha um tamanho para uma das variáveis independentes, por exemplo,  $\Delta x_j$ . Geralmente, seleciona-se a variável que tem-se maior conhecimento, ou aquela que tem maior coeficiente de regressão em módulo  $|\hat{\beta}_j|$ .

2. O passo nas demais variáveis é:

$$\Delta x_i = \frac{\hat{\beta}_i}{\hat{\beta}_j / \Delta x_j} \quad i = 1, 2, \dots, k; i \neq j$$

3. Converter  $\Delta x_i$  das variáveis codificadas para as variáveis naturais.

Os Experimentos (tratamentos) são conduzidos ao longo do caminho da inclinação ascendente até que não ocorram mais acréscimos na resposta. Em seguida um novo modelo de primeira ordem pode ser ajustado, um novo caminho de inclinação ascendente determinado, e o processo continuado. Eventualmente, o pesquisador pode chegar na vizinhança do ponto ótimo. Isto é indicado pela falta de ajuste do modelo de primeira ordem. Neste momento, experimentos adicionais (tratamentos) são realizados para obter uma estimativa mais precisa do ótimo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão apresentados os resultados obtidos a partir das análises realizadas anteriormente. As caracterizações e classificações do cimento, da areia e do RSL, as análises de sólidos totais e umidade dos materiais E/S; as análises de integridade/durabilidade; imobilização dos contaminantes, pH e DQO dos resíduos E/S. Na caracterização do cimento, da areia e do RSL, foram determinados os parâmetros Umidade, Sólidos Totais e pH.

Para avaliar os materiais E/S seguiu-se o protocolo proposto por Brito (2007), a qual esta avaliação ocorreu de acordo com os resultados dos ensaios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes. Para avaliar, os resíduos E/S, quanto à integridade/durabilidade foram realizados ensaios de Umidificação e Secagem (U/S) e Capacidade de Absorção de Água (CAA), Resistência a compressão (RC).

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO, AREIA E RSL

O cimento CP II – Z 32 da marca Montes Claros, a areia e o Resíduo Sólido de Laboratório, foram caracterizados quanto ao teor de sólidos totais, sólidos voláteis, sólidos totais fixos, Umidade e pH, conforme consta na Tabela 11.

Tabela 11- Caracterização dos sólidos totais, suas frações e pH.

| Materiais | Parâmetros |        |        |       |       |
|-----------|------------|--------|--------|-------|-------|
|           | % ST       | % STV* | % STF* | % U   | pH    |
| Cimento   | 98,00      | 2,04   | 97,96  | 2,00  | 12,08 |
| Areia     | 97,60      | 0,07   | 99,93  | 2,40  | 9,94  |
| RSL       | 89,97      | 17,78  | 82,22  | 10,03 | 6,21  |

LEGENDA: ST: Sólidos Totais; STF: Sólidos Totais Fixos; STV: Sólidos Totais Voláteis; U: Umidade; RSL: Resíduo sólido de laboratório; \*Valor em função dos sólidos totais.

Fonte: Dados da pesquisa, (2021).

Na Tabela 12 estão os dados de caracterização dos aglomerantes e resíduos obtidos em outras pesquisas, utilizando o processo Estabilização por Solidificação.

Tabela 12- Caracterização dos aglomerantes e resíduos de outras pesquisas.

| Referências      | Resíduos           | Parâmetros |                   |       |
|------------------|--------------------|------------|-------------------|-------|
|                  | Aglomerantes       | ST (%)     | %H <sub>2</sub> O | pH    |
| Paixão (2019)    | RSL                | 99,01      | 0,99              | 5,60  |
|                  | Cimento (CPII-Z32) | 99,97      | 0,03              | 14,24 |
|                  | Areia              | 99,98      | 0,02              | 7,72  |
| Silva (2018)     | RSL                | 87,57      | 12,43             | -     |
|                  | Cimento (CPII-Z32) | 99,25      | 0,75              | -     |
|                  | Areia              | 99,81      | 0,19              | -     |
|                  | Brita              | 99,98      | 0,02              | -     |
| Guimarães (2017) | Lodo de Curtume    | 98,20      | 1,74              | 7,2   |
|                  | Cimento(CIMPOR)    | 98,20      | 1,81              | 8,2   |
|                  | Areia              | 99,80      | 0,23              | 8,3   |
| Oliveira (2012)  | RSS                | 97,82      | 2,18              | 6,13  |
|                  | Cimento (CIMPOR)   | 99,82      | 1,83              | 13,24 |
| Rocha (2010)     | RSS                | 96,80      | 3,20              | 12,18 |

ST: Sólidos Totais; %H<sub>2</sub>O: Umidade em %; pH: Potencial Hidrogeniônico; RSL: Resíduo sólido de laboratório; RSS: Resíduo Sólido Sintético.

Fonte: PAIXÃO (2019); SILVA (2018); GUIMARÃES (2017); OLIVEIRA (2012); ROCHA (2010).

O cimento utilizado na presente pesquisa, da marca Montes Claros apresentou 98% de sólidos totais, 2,04 de sólidos totais voláteis, devido à pouca quantidade de matéria orgânica existente no cimento, 97,96 % de sólidos totais fixos, devido ao teor de compostos inorgânicos como, por exemplo, a areia adicionada ao cimento, teor de 2,0 % de umidade e um pH alcalino na faixa de 12,08.

Os resultados de sólidos totais e teor de umidade do cimento utilizado neste trabalho ficaram próximos aos encontrados por outros autores tais como: Paixão (2019) e Silva (2018), que utilizaram o Cimento ELIZABETH CP II – Z 32, obtendo respectivamente 99,97% e 99,25% de Sólidos totais e 0,03% e 0,75% de umidade. Já Guimarães (2017) e Oliveira (2012) utilizaram o Cimento Portland Comum da marca CIMPOR, e obtiveram como resultados respectivamente 98,2% e 99,82% de Sólidos totais e 1,81% e 1,83% de Umidade.

De acordo com as Tabelas 11 e 12, todas as caracterizações referentes à umidade dos cimentos de diferentes marcas ficaram abaixo de 2%. O menor percentual de umidade foi encontrado por Paixão (2019) que foi de 0,03% usando o cimento da marca ELIZABETH. Esses

baixos teores de umidade encontrados nos cimentos citados anteriormente, ocorrem devido às altas concentrações de sólidos totais e ao elevado teor de matéria seca. Não é viável para o processo de estabilização por solidificação que o resíduo apresente uma quantidade elevada de água, pois o seu excesso dificulta as reações entre os agentes solidificantes e o resíduo sólido de laboratório (SILVA, 2018).

O cimento utilizado nesta pesquisa apresentou um pH alcalino de 12,08, devido à presença de portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) em sua composição, a qual é formada a partir da hidratação seca do clínquer e dentro da faixa estabelecida pela ABNT NBR – 11578 (1991). Os cimentos utilizados por Paixão (2019) (pH= 14,24), Guimarães (2017) (pH = 8,2) e Oliveira (2012) (pH = 13,24) também apresentaram teor alcalino, conforme estabelecido pela norma.

A areia utilizada nesse trabalho apresentou teor de 97,60 % em relação aos sólidos totais, 0,07 % de sólidos totais voláteis, 99,03% de sólidos totais fixos e umidade de 2,40 %, enquanto o pH foi em torno de 9,94. Estes resultados obtidos estão de acordo com as pesquisas de Paixão (2019), Silva (2018) e Guimarães (2017) que obtiveram respectivamente 99,98%, 99,81% e 99,8% de sólidos totais e 0,02%, 0,19% e 0,23% de Umidade. Em relação ao pH da areia, foi obtido um valor de 9,94 indicando que a mesma possui um caráter básico. Já Paixão (2019) e Guimarães (2017) identificaram um pH respectivamente de 7,72 e 8,3, também indicando uma tendência básica.

O Resíduo Sólido de Laboratório apresentou 89,97 % de sólidos totais, ou seja, o total de massa seca, seja de origem orgânica ou inorgânica, indicando que este RSL apresenta elevada massa a ser tratada, 17,78 % representa a fração de sólidos totais voláteis, ou seja, a matéria orgânica presente no RSL, 82,22 % corresponde aos sólidos totais fixos, ou seja, o material inorgânico. Já com relação à umidade, obteve-se um valor de 10,03 % e um pH levemente ácido em torno de 6,21.

Relacionando os resultados obtidos na pesquisa com os dados da Tabela 12 é possível observar que a umidade dos resíduos é bastante variável. O RSL da pesquisa apresentou 10,03% de umidade sendo superior ao RSL estudado por Paixão (2019) que foi de (0,99%) e inferior à umidade encontrada por Silva (2018) utilizando RSL, (12,43%), chegando a um valor mais próximo da presente pesquisa. Em relação ao lodo de curtume Guimarães (2017), obteve uma umidade de (1,74%). Já o Resíduo Sólido Sintético de Oliveira (2012), (2,18%), e Rocha (2010), (3,20%), também apresentaram teores inferiores de umidade.

A baixa umidade torna viável o processo de Estabilização por Solidificação para o tratamento deste resíduo, pois o excesso de água pode separar os agentes aglomerantes do resíduo dificultando assim a reação entre eles. Com isso, o teor de umidade encontrado no RSL

do presente trabalho se apresenta em uma faixa considerável para atingir uma maior eficiência no processo de E/S.

Em relação ao pH do Resíduo Sólido de Laboratório tratado no presente trabalho, o mesmo apresentou-se em torno de 6,21, indicando um caráter ácido. Esse aspecto também foi encontrado por Paixão (2019) que obteve um pH do RSL de 5,60 indicando um teor ácido. Já Guimarães (2017) tratando o Lodo de Curtume encontrou um pH de 7,2, indicando um caráter neutro do resíduo. Enquanto Oliveira (2012) e Rocha (2010) tratando Resíduo Sólido Sintético encontraram respectivamente um pH de 6,13 e 12,18 indicando caráter ácido e básico desse resíduo.

A partir dos teores encontrados para o cimento, aglomerantes e RSL, evidenciou-se a alta eficiência para o tratamento do resíduo utilizando a E/S, pois, esta técnica é indicada para materiais com elevado teor de sólidos totais.

## 4.2 AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE E DURABILIDADE

A seguir são apresentados os resultados da integridade e durabilidade: Umidificação/secagem, capacidade de absorção de água e resistência à compressão. De acordo com o protocolo de avaliação de Brito (2007), para que um material E/S seja aprovado quanto à integridade e durabilidade é necessário que sejam satisfeitos os critérios de integridade e durabilidade e limites mínimos e máximos permissíveis apresentados na Tabela 13.

Tabela 13- Critérios de Integridade/Durabilidade e limite máximos permitidos.

| Critério de Avaliação | Material E/S | Material E/S c/ Restrição | Material Solidificado | Material Estabilizado | Estabilizado c/ Restrição |
|-----------------------|--------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
|                       | (I)          | (II)                      | (III)                 | (IV)                  | (V)                       |
| RC                    | ≥ 1 Mpa      | ≥ 1 Mpa                   | ≥ 0,8 MPa             | < 1 Mpa               | < 1 Mpa                   |
| CAA                   | ≤ 40 %       | ≤ 40 %                    | > 40 %                | > 40 %                | > 40 %                    |
| U/S                   | ≤ 15%        | ≤ 15%                     | ≤ 15%                 | ≤ 15%                 | ≤ 15%                     |

LEGENDA: (I) Utilização sem restrição, (II) Utilização com restrição, (III) Aterro de resíduos perigosos, (IV) disposição em aterro de materiais inertes e (V) Aterro de resíduos não perigosos (aterro sanitário urbano).

Fonte:BRITO (2007).

### 4.2.1 UMIDIFICAÇÃO E SECAGEM

O ensaio de U/S é um parâmetro importante para avaliar a durabilidade das matrizes cimentícias quando submetidas a mudanças de temperatura. Segundo Brito (2007), para que os

corpos de prova sejam aprovados neste ensaio, a perda em peso do material, ao término dos ciclos de umidificação e secagem não deve ser superior a 15% em relação ao seu peso inicial como estabelecido na Tabela 14.

A Tabela 14 apresenta os resultados do ensaio de umidificação e secagem correspondente aos 7 tratamentos do planejamento fatorial com adição de 3 pontos centrais.

Tabela 14- Resultados obtidos para a Umidificação e Secagem.

| Experimento      | Fator codificado Temperatura de Cura | Fator codificado Porcentagem de RSL | Valor Real da Temperatura de Cura(°C) | Valor Real da Porcentagem de RSL(%) | Variável Resposta U/S (%) |
|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Exp <sub>1</sub> | -1                                   | -1                                  | 6                                     | 10                                  | 14,56                     |
| Exp <sub>2</sub> | +1                                   | -1                                  | 50                                    | 10                                  | 1,19                      |
| Exp <sub>3</sub> | -1                                   | +1                                  | 6                                     | 45                                  | -                         |
| Exp <sub>4</sub> | +1                                   | +1                                  | 50                                    | 45                                  | -                         |
| Exp <sub>5</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | 1,72                      |
| Exp <sub>6</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | 1,82                      |
| Exp <sub>7</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | 1,79                      |

Fonte: Dados da pesquisa, (2021).

Analisando os resultados apresentados na Tabela 14, pode-se observar que todos os experimentos foram aprovados quanto à umidificação e secagem obtendo perdas de massa inferiores a 15%, com exceção dos testes com 45% de resíduo em sua composição, que não resistiram o término da análise, possivelmente devido à alta porcentagem de RSL em suas composições, reduzindo as propriedades físico-químicas de interação com o cimento.

Considerando a influência dos fatores utilizados (temperatura de cura e porcentagem de RSL), é possível observar que quando submetido ao tempo de cura em baixas temperaturas, aumenta o percentual de U/S, como pode ser observado no experimento 1, no qual a temperatura de cura foi de 6°C com 10% de RSL em sua composição, obtendo como resultado um percentual de 14,56% de U/S. Enquanto o experimento com a mesma quantidade de RSL foi submetido à temperatura de cura de 50°C, obteve o menor percentual de U/S de 1,19%.

Analisando os pontos centrais, compostos por 27,5% de RSL e submetidos à temperatura de cura de 28°C ± 2°C, pode-se observar que tiveram como resposta um percentual entre 1,72% e 1,82% de U/S, atingindo percentuais baixos com resultados satisfatórios, bem abaixo do valor máximo permissível que era 15%.

Fazendo-se uma análise geral da influência dos fatores empregados no experimento, pode-se concluir que para o teste de U/S a temperatura de cura e o percentual de resíduo influenciam diretamente na variável resposta, tendo em vista que com o aumento da temperatura de cura, há uma diminuição no percentual de U/S.

Isso acontece, porque durante o período de cura os experimentos estão perdendo umidade, e a temperatura a qual os mesmos estão submetidos pode acelerar ou retardar esse processo. Em relação ao percentual de RSL na composição dos experimentos pode-se concluir que o aumento do percentual de resíduo aumenta o percentual de U/S, como aconteceu utilizando 45% de RSL e os experimentos não foram aprovados no teste, concluindo que quanto maior for a temperatura de cura e menor o percentual de resíduo, menor será a perda de massa.

Paixão (2019) ao realizar o ensaio de U/S observou que todos os experimentos foram aprovados quanto à umidificação e secagem, visto que para todos os percentuais de RSL (5%, 10% e 20%) foram obtidas perdas de massa inferior a 15%. Sendo o melhor resultado de U/S, as matrizes que tinham 10% de RSL, pois neste percentual de resíduo obteve-se a menor perda de massa média, 0,92%.

#### 4.2.1.1 Análise Variância (ANOVA): Umidificação e Secagem

A Tabela 15 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de U/S dos materiais E/S.

Tabela 15- Análise de variância dos resultados de umidificação e secagem.

| Fonte             | GL | SQ      | QM      | Valor F  | Valor-P      |
|-------------------|----|---------|---------|----------|--------------|
| <b>Linear</b>     | 2  | 191,705 | 95,852  | 36399,66 | <b>0,000</b> |
| <b>T(°C)</b>      | 1  | 44,689  | 44,689  | 16970,59 | <b>0,000</b> |
| <b>% RSL</b>      | 1  | 147,016 | 147,016 | 55828,72 | <b>0,000</b> |
| <b>T(°C)*%RSL</b> | 1  | 44,689  | 44,689  | 16970,59 | <b>0,000</b> |
| <b>Curvatura</b>  | 1  | 253,519 | 253,519 | 96272,90 | <b>0,000</b> |
| <b>Erro</b>       | 2  | 0,005   | 0,003   |          |              |
| <b>Total</b>      | 6  | 489,918 |         |          |              |

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSL: Resíduo sólido de laboratório; T: Temperatura

\* Valor  $P$ :  $P \leq 0,05$  médias significativamente diferentes,  $P > 0,05$  diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 15, a análise de variância da U/S mostra que os valores de  $p$  para a temperatura, porcentagem e interação foram 0,000. Esses valores foram menores que o nível de significância adotado ( $p \leq 0,05$ ). Pode-se afirmar com 95% de confiança que a diferença estatística é significativa entre os tratamentos utilizados.

Para a curvatura, o valor de  $p$  foi também, menor ou igual ( $\leq 0,05$ ). Neste caso, se houver interesse em fazer a otimização, um grau superior à primeira ordem deve ser testada. Por exemplo, pode-se otimizar a melhor resposta usando um modelo de segunda ordem, para tanto deve-se ampliar os níveis dos fatores estudados. Como o objetivo da pesquisa foi apenas analisar os dados experimentais, o modelo que melhor se ajustou à resposta foi o linear. A seguir será interpretado o modelo linear.

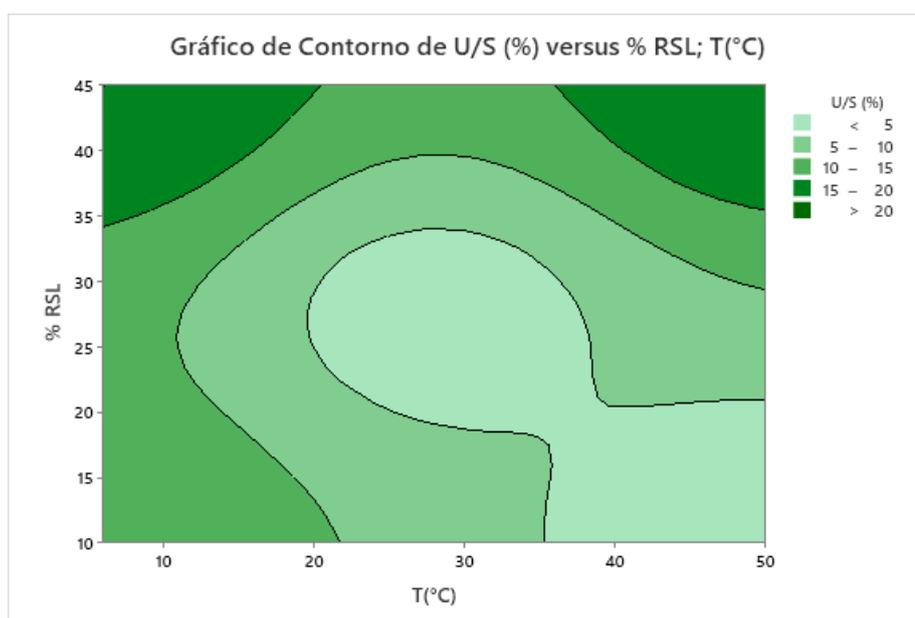
#### 4.2.1.2 Modelo e Gráfico para o percentual de Umidificação e Secagem

Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos percentuais de umidificação e secagem (U/S) em função da temperatura e do percentual de RSL, obteve-se o perfil representado na equação 20.

$$U/S(\%) = 15,3498 - 0,39068 T(^{\circ}C) + 0,10334 \% RSL + 0,008682 T(^{\circ}C) * \% RSL - 12,1608 Pt Ct \text{ Eq (20)}$$

O modelo da Eq. 20 representa um modelo linear. Na Tabela 15 o valor de  $p$  da curvatura foi 0,000. Visto que o *valor de*  $p < 0,05$  pode haver curvatura na região do ótimo (da região dos fatores %RSL e  $T(^{\circ}C)$ ). Como o objetivo não foi encontrar o ótimo, será adotado o modelo linear. O gráfico obtido para o ensaio de umidificação e secagem está apresentado na Figura 14.

Figura 14- Superfície de contorno da temperatura em função do % RSL para U/S.



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Ao analisar a Figura 14 pode-se observar que à medida que aumenta a temperatura de cura diminui o percentual de umidificação e secagem. E os maiores percentuais foram obtidos

nos experimentos contendo 45% de RSL em sua composição como pode ser observado nos cantos superiores da figura apresentando tonalidade verde mais escura, logo, devido ao elevado percentual de U/S ambos os testes não foram aprovados seguindo os critérios estabelecidos na Figura 14.

Além disso, é possível observar que a temperatura de cura influencia diretamente nas respostas do ensaio, pois, nos experimentos com 10% de RSL em sua composição e submetidos a temperaturas diferentes (6°C e 50°C) foram obtidos resultados totalmente opostos (14,56% e 1,19 %) respectivamente.

Bandeira (2010) ao realizar o ensaio de U/S utilizando diferentes concentrações de resíduo sólido (10%, 15% e 20%) e diferentes temperaturas de cura (0°C, 20°C e 40°C), observou que apenas o tratamento com 20% de resíduo e submetido a temperatura de cura de 0°C foi reprovado, obtendo um percentual de 21,71% e os demais tratamentos foram aprovados por estar dentro do limite máximo permissível, inferior a 15%. O menor percentual de U/S foi obtido com o tratamento com 20% de resíduo e submetido à temperatura de 40°C (8,04%).

Andrade *et al.* (2016) realizaram ensaios de U/S com a finalidade de observar a eficiência do material E/S submetido às variações de temperatura que ocorrem no meio ambiente, variando a concentração de resíduo e tempo de cura. Com isso, foi verificado que o percentual de resíduo não exerce uma influência considerável sobre a perda de massa, pois, ao aumentar o percentual de resíduo de 15 para 25% observou uma variação de apenas 1,26% do valor da perda de massa, passando de 4,75 para 4,81% para um tempo de cura de 28 dias. Já o experimento submetido a um tempo de cura de 7 dias, ao variar o percentual de resíduo em 10% observou-se uma variação da U/S de apenas 0,73%.

Comparando os resultados de Bandeira (2010) com os resultados obtidos no presente trabalho, observa-se que em ambos o percentual de resíduo não influenciou no percentual de perda de massa, sendo a temperatura de cura o principal fator que influenciou no percentual de U/S. logo com o aumento da temperatura tem-se uma diminuição no valor do resultado do ensaio.

#### 4.2.2 CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Foram realizados experimentos a partir dos 7 tratamentos do planejamento fatorial com adição de 3 repetições no ponto central. Na Tabela 16 estão apresentados os resultados dos ensaios de capacidade de absorção de água que foram realizados na presente pesquisa.

Tabela 16- Resultados obtidos para a capacidade de absorção de água.

| Experimento      | Fator codificado Temperatura de Cura | Fator codificado Porcentagem de RSL | Valor Real da Temperatura de Cura(°C) | Valor Real da Porcentagem de RSL(%) | Variável Resposta CAA (%) |
|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Exp <sub>1</sub> | -1                                   | -1                                  | 6                                     | 10                                  | 2,40                      |
| Exp <sub>2</sub> | +1                                   | -1                                  | 50                                    | 10                                  | 14,59                     |
| Exp <sub>3</sub> | -1                                   | +1                                  | 6                                     | 45                                  | -                         |
| Exp <sub>4</sub> | +1                                   | +1                                  | 50                                    | 45                                  | -                         |
| Exp <sub>5</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | 14,07                     |
| Exp <sub>6</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | 15,28                     |
| Exp <sub>7</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | 14,76                     |

Fonte: Dados da pesquisa, (2021).

Conforme os resultados da Tabela 16, o limite permissível é  $\leq 40\%$  (ABNT NBR 9778, 1987b) para o ensaio de CAA. Dessa forma, todos os tratamentos realizados foram aprovados, com exceção dos tratamentos com 45% de RSL na composição, que não resistiram ao término do teste, devido à alta concentração de resíduo na composição comprometendo diretamente a porosidade dos mesmos.

Ao comparar os resultados de capacidade de absorção de água, obtidos na presente pesquisa levando em consideração a temperatura de cura e a porcentagem de RSL pode-se observar que o experimento submetido à temperatura de cura de 6°C e com 10% de RSL na composição obteve a menor absorção de água (2,40 %), possuindo a menor porosidade. Isso acontece, pois durante o período de cura os experimentos perdem umidade e a baixa temperatura retarda essa perda. Logo, quando submetido ao teste de CAA o experimento não absorve muita água e por conter uma pequena quantidade de RSL, possui uma menor porosidade contribuindo para atingir um baixo percentual de CAA.

O experimento composto com a mesma porcentagem de RSL(10%), submetido a diferentes temperaturas de cura (6°C e 50°C) obtiveram um percentual de CAA opostos (2,40% e 14,59%) respectivamente. Isso ocorre devido à elevada temperatura a que o experimento foi exposto, influenciando na rápida perda de umidade durante o período de cura e aumentando a porosidade.

Analisando os pontos centrais compostos por 27,5% de RSL e com temperatura de cura de  $28^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  pode-se observar que atingiram entre 14,07% e 15,28% de CAA, ressaltando essa relação entre o percentual de resíduo e temperatura de cura.

De um modo geral, pode-se concluir que quanto menor for a quantidade de resíduo utilizada e menor for a temperatura de cura, menor será o percentual de CAA do experimento, tendo em vista que esses fatores influenciam diretamente na porosidade facilitando ou dificultando a absorção de água. Segundo Brito (2007), a absorção de água é inversamente proporcional à RC, ou seja, quanto maior a capacidade do corpo absorver água, menor será a resistência desse corpo em suportar carga, rompendo-se mais facilmente e, conseqüentemente, aumentando a lixiviação.

#### 4.2.2.1 Análise Variância (ANOVA): Capacidade de absorção de água

A Tabela 17 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de CAA dos materiais E/S.

Tabela 17- Análise de variância dos resultados de capacidade de absorção de água.

| Fonte             | GL | SQ      | QM      | Valor F | Valor-P |
|-------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| <b>Linear</b>     | 2  | 1369,76 | 684,88  | 1858,90 | 0,001   |
| <b>T(°C)</b>      | 1  | 37,15   | 37,15   | 100,83  | 0,010   |
| <b>% RSL</b>      | 1  | 1332,62 | 1332,62 | 3616,98 | 0,000   |
| <b>T(°C)*%RSL</b> | 1  | 37,15   | 37,15   | 100,83  | 0,010   |
| <b>Curvatura</b>  | 1  | 248,68  | 248,68  | 674,96  | 0,001   |
| <b>Erro</b>       | 2  | 0,74    | 0,37    |         |         |
| <b>Total</b>      | 6  | 1656,33 |         |         |         |

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSL: Resíduo sólido de laboratório; T: Temperatura

\* Valor P:  $P \leq 0,05$  médias significativamente diferentes,  $P > 0,05$  diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 17, as análises de variância do percentual de CAA mostram que os valores de  $p$  para a temperatura, porcentagem e interação foram respectivamente 0,010; 0,000; 0,010. Esses valores foram menores que o nível de significância adotado ( $P \leq 0,05$ ). Pode-se afirmar com 95% de confiança que a diferença estatística é significativa entre os tratamentos utilizados.

Para a curvatura o valor de  $p$  foi 0,001. Se houvesse interesse em fazer a otimização, um grau superior ao de primeira ordem deveria ser testado. Como o objetivo da pesquisa foi apenas analisar os dados experimentais, o modelo que melhor se ajustou à resposta foi o linear. A seguir será interpretado o modelo linear da capacidade de absorção de água.

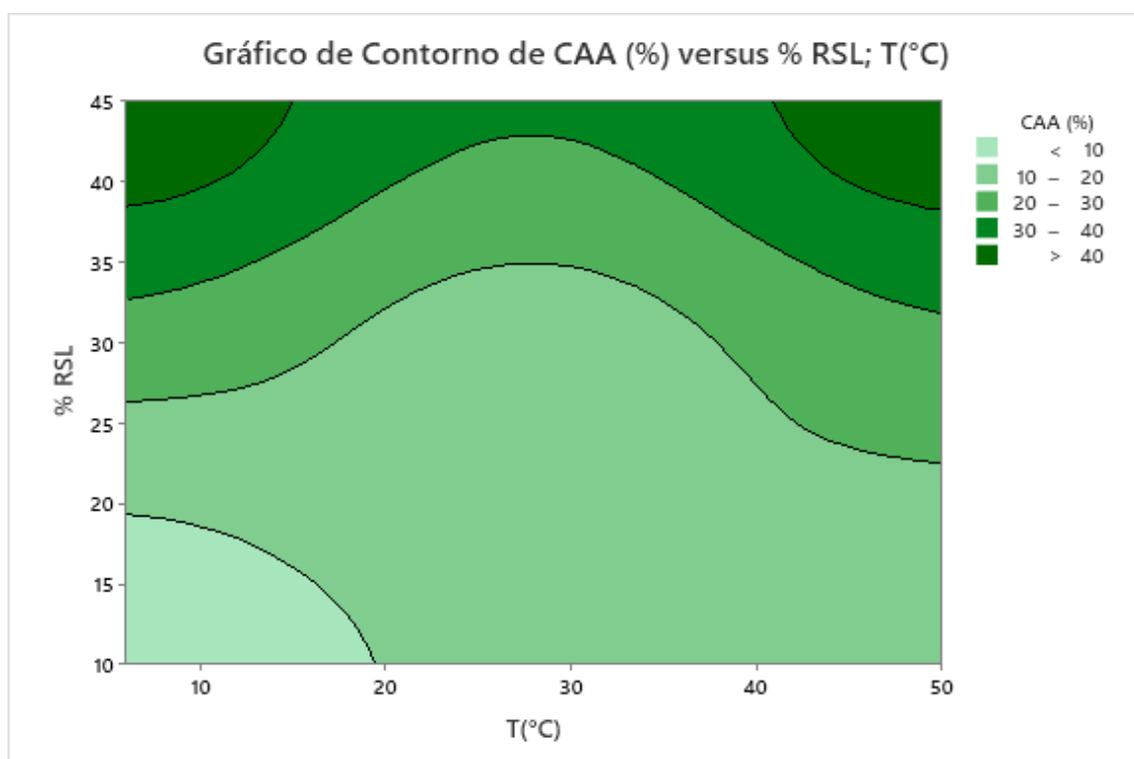
#### 4.2.2.2 Modelo e Gráfico para o percentual de Capacidade de absorção de água

Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos percentuais de capacidade de absorção de água (CAA) em função da temperatura e do percentual de RSL, obteve-se o perfil representado na equação 21.

$$CAA(\%) = -11,909 + 0,3562 T(^{\circ}C) + 1,2646 \% RSL - 0,007916 T(^{\circ}C) * \% RSL - 12,044 Pt Ct \quad Eq (21)$$

O gráfico obtido para o ensaio de capacidade de absorção de água está apresentado na Figura 15.

Figura 15- Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para CAA.



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

De acordo com a Figura 15 pode-se observar que os maiores percentuais de CAA foram registrados nos experimentos com 45% de RSL em sua composição, como está ilustrado nos cantos superiores com a tonalidade verde escura, logo esses experimentos não foram aprovados pois atingiram um percentual superior a 40% como foi estabelecido por Brito (2007). O menor percentual de CAA foi obtido no experimento com 10% de RSL e submetido à temperatura de cura de 6°C, ilustrado no canto inferior esquerdo na tonalidade verde clara.

Observa-se que a temperatura de cura influencia diretamente na resposta do experimento, pois os testes com a mesma porcentagem de RSL(10%), submetido a diferentes temperaturas de cura (6°C e 50°C) obtiveram percentuais de CAA opostos (2,40% e 14,59%)

respectivamente, comprovando estatisticamente a interferência direta da temperatura de cura no resultado. Logo, à medida que aumenta a temperatura de cura, aumenta-se o percentual de CAA.

Bandeira (2010) ao realizar o ensaio de CAA com variação nas concentrações de resíduo sólido (10%, 15% e 20%) e diferentes temperaturas de cura (0°C, 20°C e 40°C), observou que o tratamento composto com 20% de resíduo e submetido à temperatura de cura de 0°C obteve uma resposta de 47,50%, conseqüentemente sendo reprovado pois ficou acima do limite máximo permissível de 40%. Os demais experimentos tiveram valores dentro do limite e, portanto, aprovados.

Andrade *et al.* (2016) durante seus experimentos realizaram o ensaio de CAA no tratamento de lodo de curtume utilizando E/S, submetidos a diferentes percentuais de resíduo (15 e 25%) e diferentes tempos de cura (07 e 28 dias). Com o tempo de cura fixo de 28 dias, para 15% de resíduo obteve-se um percentual de absorção de água de 18,92%, enquanto que para 25% a CAA foi de 24,99%.

Oliveira (2017) durante seu experimento incorporou resíduo de resina epóxi com fibra de vidro proveniente da fabricação de pás eólicas em argamassa de cimento Portland, e, realizou o ensaio de capacidade de absorção de água para um tempo de cura de 28 dias e 5% do resíduo, obtendo um percentual médio de CAA de 16%.

Sgorlon *et al.* (2017) realizaram o ensaio de CAA no tratamento de resíduo industrial de galvanoplastia, utilizando a técnica de E/S com cimento, com um tempo de cura de 28 dias e temperatura ambiente, atingindo um percentual médio de CAA de 6%.

Paixão (2019) realizou o ensaio de CAA variando os percentuais de RSL (5%, 10% e 20%) com temperatura ambiente, identificou que em todos os experimentos os percentuais de capacidade de absorção de água foram inferiores a 40% (**ABNT NBR 9778, 1987**), conseqüentemente tendo todas as matrizes cimentícias aprovadas no critério capacidade de absorção de água.

O experimento que apresentou menor CAA foi o teste referente à matriz cimentícia com 5% RSL, com um valor de 8,35% de CAA, enquanto que o experimento que apresentou maior absorção de água foi o teste, com 20% de RSL, com um valor de 10,30 % de CAA.

Os altos percentuais de CAA podem ser justificados pela porosidade adquirida do corpo de prova devido à temperatura de cura o qual é submetido e também devido à concentração de resíduo que é incorporada em cada matriz cimentícia.

### 4.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

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

A Tabela 18 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão relativa aos 7 tratamentos do planejamento fatorial com adição de 3 pontos centrais, os tratamentos realizados com diferentes concentrações de resíduo e diferentes temperaturas de cura, conforme a ABNT NBR 7215 (1996).

Tabela 18 - Respostas do ensaio de Resistência à Compressão (RC).

| Experimento      | Fator codificado Temperatura de Cura | Fator codificado Porcentagem de RSL | Valor Real da Temperatura de Cura(°C) | Valor Real da Porcentagem de RSL(%) | Variável Resposta RC (MPa) |
|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Exp <sub>1</sub> | -1                                   | -1                                  | 6                                     | 10                                  | 2,64                       |
| Exp <sub>2</sub> | +1                                   | -1                                  | 50                                    | 10                                  | 0,65                       |
| Exp <sub>3</sub> | -1                                   | +1                                  | 6                                     | 45                                  | 0,20                       |
| Exp <sub>4</sub> | +1                                   | +1                                  | 50                                    | 45                                  | 0,33                       |
| Exp <sub>5</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | 0,84                       |
| Exp <sub>6</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | 0,54                       |
| Exp <sub>7</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | 0,46                       |

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

Fonte: Dados da pesquisa, (2021).

Analisando as respostas obtidas no ensaio de RC pode-se observar que apenas o experimento com 10% de RSL e com temperatura de cura de 6°C foi aprovado como um material estabilizado por solidificação conforme estabelecido na Tabela 18 atingindo uma resistência de 2,64 MPa, podendo ter diversas utilizações, como materiais de base e cobertura em obras de pavimentação e como material de construção civil, dentre outras finalidades. Os demais experimentos tiveram uma resistência inferior a 1MPa, dessa forma esses experimentos devem seguir o protocolo de gerenciamento proposto por Brito (2007) para classificar e estabelecer a finalidade dos mesmos.

Os resultados obtidos estão diretamente relacionados com os valores encontrados no ensaio de CAA, pois os experimentos que apresentaram menor absorção de água apresentaram maior resistência à compressão, indicando uma relação entre as duas análises. Isso estabelece

uma explicação para os experimentos que não foram aprovados no teste de RC, pois a porcentagem de RSL e a temperatura de cura influenciaram nessa baixa resistência devido à porosidade do material.

Na Tabela 19 estão os possíveis usos do material E/S em função da Resistência à Compressão.

Tabela 19 - Uso do material E/S de acordo com a Resistência à Compressão.

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

Fonte:BRITO (2007).

Levando em consideração os dados obtidos na presente pesquisa e as informações da Tabela 19, tem-se que as amostras que atingiram uma resistência à compressão menor que 0,9 MPa podem ser utilizadas como um material termoplástico. Lembrando que o material só será estabilizado por solidificação caso também seja aprovado nos ensaios de capacidade de absorção de água, umidificação e secagem, lixiviação e solubilização (BRITO,2007).

Bandeira (2010) realizou o teste de RC com materiais E/S com diferentes concentrações de resíduo (10%, 15%, 20%) e com diferentes temperaturas de cura (0°C, 20°C, 40°C). O menor resultado (3,71 MPa) foi obtido com a temperatura de cura de 0°C com 20% de resíduo. Foi observado que os tratamentos submetidos a uma temperatura de cura de 40°C, resistiram a uma carga maior de ruptura (9,93MPa e 9,27MPa) indicando que a temperatura influencia na RC, pois com o aumento da temperatura a qual os corpos de prova são submetidos, maior foi a RC.

Brasil (2019) durante sua pesquisa realizou o teste de RC com materiais submetidos a diferentes concentrações de RSL (10% e 30%) com diferentes temperaturas de cura (6°C e 22°C) obtendo os maiores resultados para os níveis de 10% de RSL e com as temperaturas de 22°C e 6°C, com 5,0009MPa e 3,8169 MPa respectivamente. Já para os níveis de 30% e 6°C foram os ensaios que apresentaram os menores valores de RC, sendo 0,5246MPa e 0,6195 MPa ficando abaixo do limite mínimo permissível (1MPa), indicando uma baixa RC.

#### 4.2.3.1 Análise Variância (ANOVA): Resistência à compressão

A Tabela 20 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de RC dos materiais E/S.

Tabela 20-Análise de variância dos resultados de Resistência à compressão.

| Fonte              | GL | SQ      | QM      | Valor F | Valor-P      |
|--------------------|----|---------|---------|---------|--------------|
| <b>Linear</b>      | 2  | 2,76930 | 1,38465 | 34,50   | <b>0,028</b> |
| <b>T(°C)</b>       | 1  | 0,86490 | 0,86490 | 21,55   | <b>0,043</b> |
| <b>% RSL</b>       | 1  | 1,90440 | 1,90440 | 47,45   | <b>0,020</b> |
| <b>T(°C)*% RSL</b> | 1  | 1,12360 | 1,12360 | 28,00   | <b>0,034</b> |
| <b>Curvatura</b>   | 1  | 0,20012 | 0,20012 | 4,99    | <b>0,155</b> |
| <b>Erro</b>        | 2  | 0,08027 | 0,04013 |         |              |
| <b>Total</b>       | 6  | 4,17329 |         |         |              |

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSL: Resíduo sólido de laboratório; T: Temperatura

\* Valor  $P$ :  $P \leq 0,05$  médias significativamente diferentes,  $P > 0,05$  diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa (2021)

De acordo com os dados apresentados na Tabela 20, as análises de variância da resistência à compressão os valores de  $p$  para a temperatura, porcentagem e interação foram respectivamente 0,043; 0,020; 0,034. Esses valores foram menores que o nível de significância adotado ( $P \leq 0,05$ ).

Com isso, pode-se afirmar com 95% de confiança que a diferença estatística é significativa entre os tratamentos utilizados. Com isso, como o *valor de p* para a curvatura foi 0,155 ( $p \leq 0,05$ ) pode-se afirmar que o modelo que melhor representa os dados é o modelo linear. Para encontrar o ponto ótimo, pode-se usar a equação apresentada a seguir.

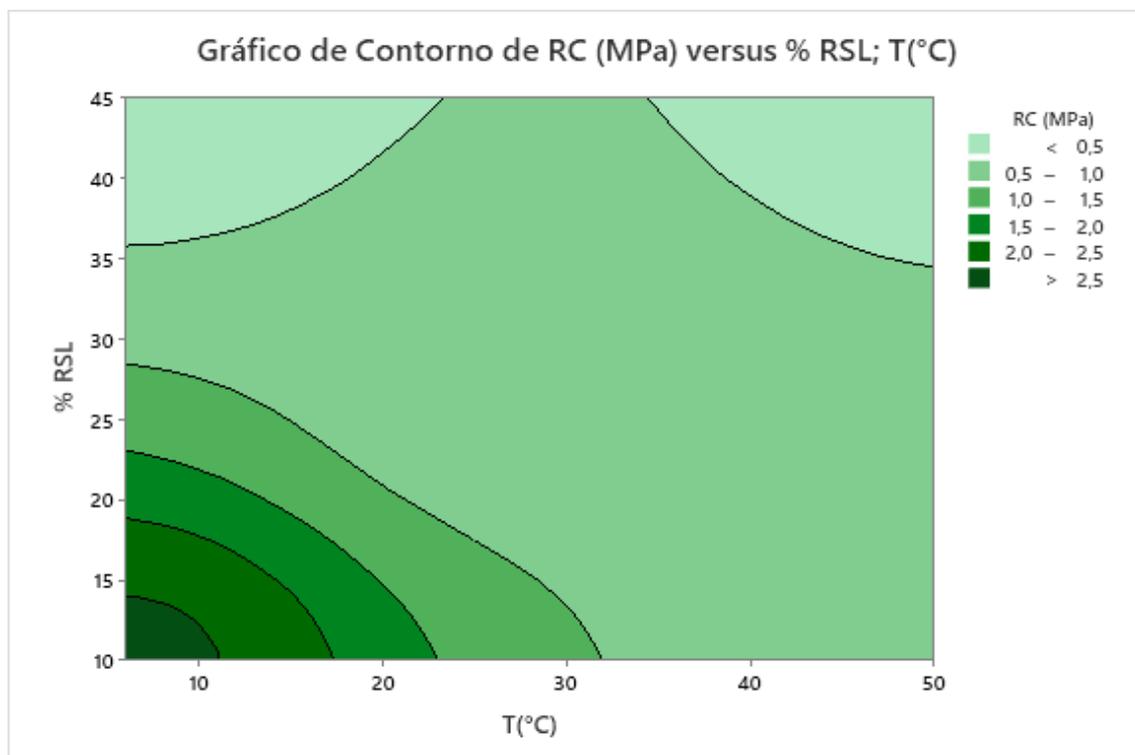
#### 4.2.3.2 Modelo e Gráfico para o percentual de Resistência à compressão

Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos percentuais de Resistência à compressão (RC) em função da temperatura e do percentual de RSL, obteve-se o perfil representado na equação 22.

$$RC(\text{MPa}) = 3,691 - 0,05899 T(^{\circ}\text{C}) - 0,07797 \% \text{ RSL} + 0,001377 T(^{\circ}\text{C}) * \% \text{ RSL} - 0,342 \text{ Pt Ct Eq (22)}$$

O gráfico obtido para o ensaio de resistência à compressão está apresentado na Figura 16.

Figura 16- Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para RC.



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Analisando a Figura 16 pode-se observar que com o aumento da concentração de RSL houve uma redução da resistência dos corpos de provas, sendo os experimentos com 45% de resíduo em sua composição os que apresentaram menor resistência como pode ser visualizado nos cantos superiores do gráfico. O único experimento aprovado segundo o protocolo de Brito (2007) foi o experimento composto com 10% de RSL em sua composição, atingindo uma resistência máxima de 2,64 MPa, representado pela cor verde escura no canto inferior esquerdo do gráfico.

A temperatura de cura também apresentou influência nas respostas dos resultados tendo em vista que na menor temperatura (6°C) obteve-se a melhor resistência e com o aumento da temperatura juntamente com o aumento da concentração de resíduo houve uma diminuição no valor do ensaio de RC, isso acontece pois, com o aumento da temperatura de cura, ocorre uma maior perda de água, conseqüentemente aumentando a porosidade tornando o corpo de prova mais frágil. Com isso, pode-se observar que o teste de RC tem ligação direta com o resultado do ensaio de CAA. Comparando os resultados obtidos no ensaio de CAA com os resultados de

RC tem-se uma relação diretamente proporcional, ou seja, os experimentos que obtiveram o menor percentual de CAA foram os que apresentaram maior resistência e os que apresentaram maior capacidade de absorção foram os experimentos que apresentaram menor resistência devido ao aumento da porosidade do material causados pelo aumento da temperatura de cura e aumento do percentual de resíduo incorporado a matriz cimentícia.

Brasil (2019) ao realizar o ensaio de RC utilizando diferentes concentrações de RSL e diferentes temperaturas de cura observou que à medida que aumenta o percentual de resíduo sólido menor é a resistência à compressão. Percebeu-se ainda que as maiores respostas para o ensaio de resistência à compressão foram obtidas quando se utilizou a menor porcentagem de RSL.

Paixão (2019) realizou o ensaio de RC no tratamento de resíduo sólido de laboratório, aplicando a técnica de E/S, variando o percentual de RSL (0%, 5%, 10% e 20%) com o tempo de cura de 28 dias. Ao concluir a análise observou-se que as maiores resistências foram obtidas nos experimentos incorporados com o menor percentual de RSL (5%), apresentando uma resistência média de 2,75 MPa.

Lima (2018), realizou o ensaio de RC no tratamento de resíduo sólido de laboratório utilizando a técnica de E/S analisando a influência de dois fatores: porcentagem de RSL (5%, 10% e 15%) e tempo de cura (7, 14 e 28) dias. Com o tempo de cura de sete dias foi obtido uma RC de 6,3587MPa e 3,7756MPa para 5% e 15%, respectivamente, observando que à medida que aumentava a concentração de resíduo tinha uma diminuição no valor da RC.

Silva (2018) durante sua pesquisa realizou o ensaio de RC no tratamento de resíduo sólido de laboratório utilizando E/S, variando o percentual de RSL (5%, 15%, 30%) e concluiu que conforme aumenta o percentual de resíduo na matriz cimentícia do corpo de prova, a RC diminui, alcançando o maior valor de RC (7,36 MPa) no experimento composto de 5% de RSL.

Bandeira (2010) ao realizar o ensaio de RC observou que a temperatura de cura apresentava influência direta no resultado de resistência, pois quanto maior a temperatura (40°C), maior foi a RC (9,93MPa e 9,27MPa) com 10% e 20% de borra oleosa de petróleo, respectivamente. Entretanto, comparando os resultados obtidos com as baixas temperaturas de cura (0°C e 20°C) observou-se que os valores da RC se mantiveram praticamente constantes, apresentando maior interferência quando ocorreu variação do percentual de resíduo, pois o aumento do percentual de resíduo diminuiu o valor da resistência do corpo de prova.

Comparando os resultados de RC obtidos na presente pesquisa com outros trabalhos é possível perceber que o aumento da temperatura de cura e o aumento da concentração de resíduo

resultam em uma diminuição dos resultados de RC, influenciando diretamente nas respostas do ensaio.

#### 4.2.4. UMIDADE, SÓLIDOS TOTAIS, SÓLIDOS TOTAIS VOLÁTEIS E SÓLIDOS TOTAIS FIXOS

Na Tabela 21 estão os valores de sólidos e suas frações obtidos após a adição de 10%, 27,5% e 45% de resíduos sólidos de laboratório numa mistura de cimento, areia e água e submetidos a temperaturas de curas (6°C, 28°C e 50°C), num planejamento fatorial e com adição de três pontos centrais.

Tabela 21- Respostas das análises de sólidos totais e umidade dos materiais E/S.

| Tratamento                              | %U    | %ST   | %STV | %STF  |
|---|-------|-------|------|-------|
| <b>T01</b> <sub>T=6°C e 10%RSI</sub>    | 8,00  | 92,00 | 2,17 | 97,83 |
| <b>T02</b> <sub>T=50°C e 10%RSI</sub>   | 1,60  | 98,40 | 2,00 | 98,00 |
| <b>T03</b> <sub>T=6°C e 45%RSI</sub>    | 11,60 | 88,40 | 2,27 | 97,73 |
| <b>T04</b> <sub>T=50°C e 45%RSI</sub>   | 2,20  | 97,80 | 4,00 | 96,00 |
| <b>T05</b> <sub>T=28°C e 27,5%RSI</sub> | 2,00  | 98,00 | 2,00 | 98,00 |
| <b>T06</b> <sub>T=28°C e 27,5%RSI</sub> | 1,80  | 98,20 | 4,00 | 96,00 |
| <b>T07</b> <sub>T=28°C e 27,5%RSI</sub> | 2,20  | 97,80 | 2,00 | 98,00 |

LEGENDA: ST: Sólidos Totais; STF: Sólidos Totais Fixos; STV: Sólidos Totais Voláteis; U: Umidade; RSL: Resíduo sólido de laboratório; \*Valor em função dos sólidos totais.  
Fonte: Dados da pesquisa, (2021).

Analisando os dados da Tabela 21, observa-se que o material tratado apresentou baixo percentual de umidade, com exceção dos tratamentos que foram submetidos à temperatura de cura de 6°C, os quais obtiveram um percentual de 8,0 % e 11,6% de umidade, tendo em vista que em baixas temperaturas o material tem dificuldade de perder água.

A determinação do teor de umidade possibilita identificar a quantidade de água livre presente no material por meio da diferença de massa antes e após a amostra permanecer na estufa a 105°C até a sua massa ser constante.

Em relação ao percentual de sólidos totais, que é o conjunto de todas as substâncias orgânicas e inorgânicas presente em uma amostra, pode-se observar que houve uma variação entre 88,40% a 98,40%. O menor percentual foi obtido com o teste submetido à menor temperatura de cura (6°C) e maior percentual de RSL (45%). Enquanto isso, o maior teor de

sólidos totais foi obtido com a maior temperatura de cura (50%) e o menor percentual de RSL (10%).

Também é possível observar que o material tratado, mesmo com a adição de diferentes porcentagens de resíduos e submetidos a diferentes temperaturas de cura se manteve com características semelhantes aos dos aglomerantes antes da mistura. Apresentando um elevado teor de material inorgânico, em torno de 96 % a 98 % como pode ser observado pelo percentual de STF e o baixo teor de material orgânico, variando entre 2,0 % a 4,0 % como demonstrado no percentual de STV.

Segundo Lima (2018), o teor de sólidos é um parâmetro importante para que o resíduo fique estável quando disposto em aterro. De acordo Von Sperling (1996), quando os sólidos são submetidos a uma temperatura elevada (550°C), sua fração orgânica é oxidada (volatilizada), restando apenas a fração inerte (não oxidada) após a combustão. Os sólidos voláteis representam uma estimativa da matéria orgânica nos sólidos, ao passo que os sólidos não voláteis (fixos ou inertes) representam a matéria inorgânica ou mineral.

#### 4.2.4.1. Análise Variância (ANOVA): Sólidos Totais

A Tabela 22 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de sólidos totais dos materiais E/S.

Tabela 22 -Análise de variância dos resultados de Sólidos totais dos materiais E/S.

| <b>FONTE</b>       | <b>GL</b> | <b>SQ</b> | <b>QM</b> | <b>VALOR F</b> | <b>VALOR-P</b> |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|
| <b>LINEAR</b>      | 2         | 66,8200   | 33,4100   | 835,25         | 0,001          |
| <b>T(°C)</b>       | 1         | 62,4100   | 62,4100   | 1560,25        | 0,001          |
| <b>%RSL</b>        | 1         | 4,4100    | 4,4100    | 110,25         | 0,009          |
| <b>T(°C) *%RSL</b> | 1         | 2,2500    | 2,2500    | 56,25          | 0,017          |
| <b>CURVATURA</b>   | 1         | 25,4100   | 25,4100   | 635,25         | 0,002          |
| <b>ERRO</b>        | 2         | 0,0800    | 0,0400    |                |                |
| <b>TOTAL</b>       | 6         | 94,5600   |           |                |                |

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSL: Resíduo sólido de laboratório; T: Temperatura

\* Valor  $P$ :  $p \leq 0,05$  médias significativamente diferentes,  $p > 0,05$  diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 22, as análises de variância dos sólidos totais mostram que os valores de  $p$  para a temperatura, porcentagem e interação foram respectivamente 0,001; 0,009 e 0,017. Esses valores foram menores que o nível de significância adotado  $p \leq 0,05$ .

Com isso, pode-se afirmar com 95% de confiança que a diferença estatística é significativa entre os tratamentos utilizados. Com isso, como o *valor de p* para a curvatura foi 0,002 ( $p \leq 0,05$ ) pode-se afirmar que o modelo que melhor representa os dados é o modelo quadrático.

#### 4.2.4.2. Modelo e Gráfico para o teor de Sólidos Totais

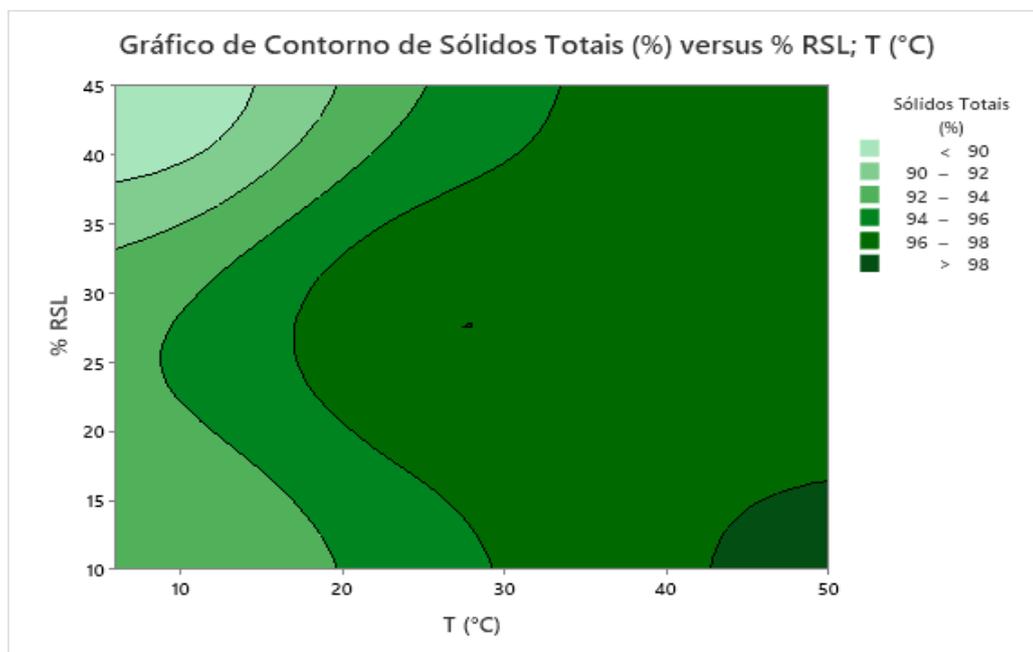
Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos sólidos totais (ST) em função da temperatura e do percentual de RSL, obteve-se o perfil representada na equação 23.

$$ST(\%) = 92,273 + 0,12597 T(^{\circ}C) - 0,11455 \%RSL + 0,001948 T(^{\circ}C) * \% RSL + 3,850 PtCt \text{ Eq (23)}$$

O modelo da Eq. 23 representa um modelo linear. Na Tabela 22 o valor de *p* da curvatura foi 0,002. Como o *valor de p* < 0,05 não houve curvatura na região do ótimo (da região dos fatores % e temperatura). O modelo que melhor representa os dados dos fatores é linear.

O gráfico obtido para o teor de sólidos totais está apresentado na Figura 17.

Figura 17- Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para os ST.



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Analisando as curvas de contorno obtidas na Figura 17 constatou-se que, de fato, as maiores porcentagens de sólidos totais estão apresentadas para as temperaturas mais altas, conforme mostram os tons de verde mais escuro na parte inferior direita da Figura,

consequentemente diminuindo a umidade. Nota-se ainda que à medida que se aumenta a porcentagem de RSL observou-se uma diminuição na porcentagem de sólidos totais.

Brasil (2019) estudou o teor de sólidos totais e umidade em materiais E/S submetidos a diferentes temperaturas de cura (6°C e 22°C) e diferentes percentuais de RSL (10% e 30%), concluindo que os maiores valores de sólidos totais (97,47%) foram encontrados para os testes submetidos à temperatura de 22°C e o percentual de 10% de RSL, isso pode ter ocorrido, pois o aumento da temperatura aumenta a taxa de evaporação da água, consequentemente diminuindo a umidade.

Já o menor teor de sólidos totais (90,59%) foi encontrado utilizando a menor temperatura e o maior percentual de resíduo.

Paixão (2019) ao analisar o teor de sólidos totais presente nos materiais E/S concluiu que à medida que aumenta o percentual de resíduo o percentual de sólidos totais diminui, aumentando assim o teor de umidade. Com tempo de cura de 28 dias, temperatura ambiente do laboratório (aproximadamente 25°C) e com 10% de resíduo sólido o percentual médio de sólidos totais foi 99,83%.

Lima (2018) analisando o material contaminado com RSL e tratado por E/S, observou que após o tratamento foi obtido baixos valores de umidade, próximos a 1,5%. Além disso, o material tratado, mesmo com a adição de diferentes porcentagens de resíduos e submetidos a diversos tempos de cura se manteve com características semelhantes ao dos aglomerantes antes da mistura apresentando um elevado teor de materiais inorgânicos (97%) e um baixo teor de material orgânico (2%).

Diante disso, pode-se afirmar que tanto a temperatura de cura quanto o percentual de resíduo utilizado influenciam diretamente na resposta dos resultados dos sólidos totais e umidade, sendo que os maiores percentuais de sólidos totais (98,40%) são obtidos com as maiores temperaturas de cura (50°C) e menores percentuais de RSL (10%) enquanto os menores percentuais de sólidos totais (88,40%) são obtidos com as menores temperaturas de cura (6°C) e os maiores percentuais de RSL (45%).

#### 4.2.4.3. Análise Variância (ANOVA): Sólidos Totais Fixos

A Tabela 23 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de sólidos totais fixos dos materiais E/S.

Tabela 23- Análise de variância dos resultados de Sólidos totais fixos dos materiais E/S.

| <b>FONTE</b>      | <b>GL</b> | <b>SQ</b> | <b>QM</b> | <b>VALOR F</b> | <b>VALOR-P</b> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|
| <b>LINEAR</b>     | 2         | 1,71090   | 0,85545   | 0,64           | <b>0,609</b>   |
| <b>T(°C)</b>      | 1         | 0,60840   | 0,60840   | 0,46           | <b>0,569</b>   |
| <b>%RSL</b>       | 1         | 1,10250   | 1,10250   | 0,83           | <b>0,459</b>   |
| <b>T(°C)*%RSL</b> | 1         | 0,90250   | 0,90250   | 0,68           | <b>0,497</b>   |
| <b>CURVATURA</b>  | 1         | 0,00550   | 0,00550   | 0,00           | <b>0,955</b>   |
| <b>ERRO</b>       | 2         | 2,66667   | 1,33333   |                |                |
| <b>TOTAL</b>      | 6         | 5,28557   |           |                |                |

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSL: Resíduo sólido de laboratório; T: Temperatura

\* Valor  $P$ :  $P \leq 0,05$  médias significativamente diferentes,  $P > 0,05$  diferença não significativa.  
Fonte: Dados da pesquisa (2021).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 23, as análises de variância dos sólidos totais fixos mostram que os *valores de p* para a temperatura, porcentagem e interação foram respectivamente 0,569; 0,459 e 0,497. Esses valores foram maiores que o nível de significância adotado ( $P \leq 0,05$ ). Com isso, pode-se afirmar que a diferença estatística para os sólidos totais fixos não foi significativa entre os tratamentos utilizados. Pode se afirmar com 95% de confiança que os fatores porcentagem e temperatura de cura e a interação não influenciaram no teor de sólidos totais.

Como valor de  $p$  para a curvatura foi 0,955 pode-se afirmar que o modelo que melhor representaria os dados seria o modelo linear.

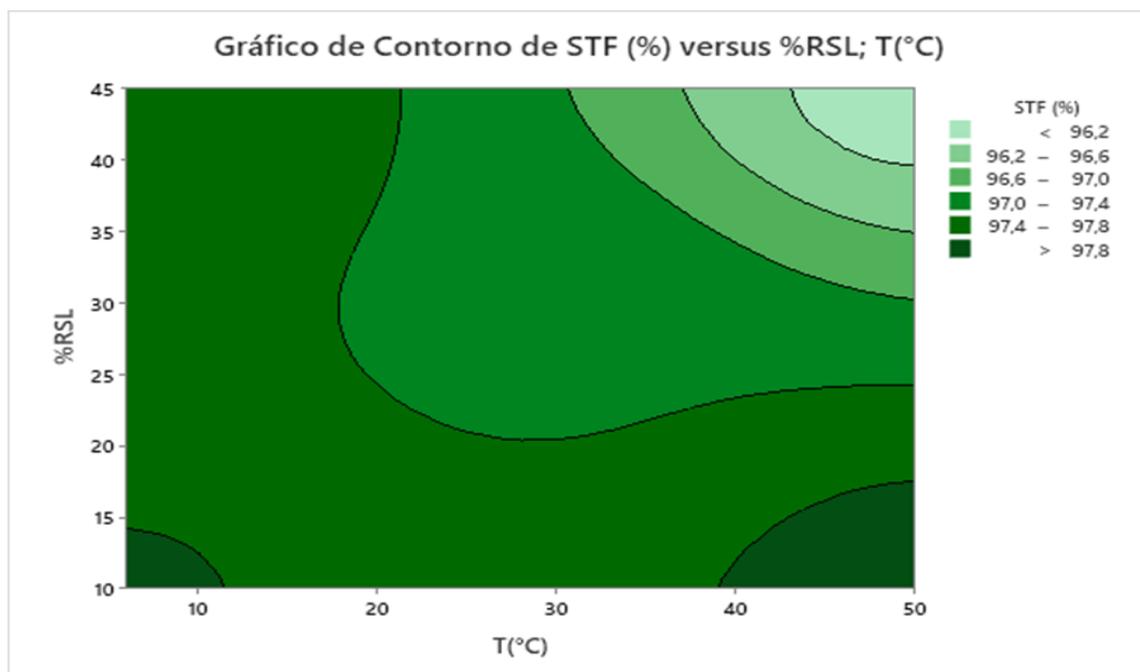
#### 4.2.4.4. Modelo e Gráfico para o teor de Sólidos Totais Fixos

Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos sólidos totais fixos (STF) em função da temperatura e do percentual de RSL, obteve-se o perfil representado na equação 24. Entretanto o valor de  $R^2$  foi igual a 49,55% indicando que o modelo abaixo (Eq 24) não foi preditivo.

$$\begin{aligned} \%STF = & 97,76 + 0,0162 T(^{\circ}C) + 0,0045 \%RSL - 0,00123 T(^{\circ}C) * \%RSL \\ & - 0,057 PtCt \quad Eq (24) \end{aligned}$$

O gráfico obtido para o teor de sólidos totais fixos está apresentado na Figura 18.

Figura 18-Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para os STF.



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Analisando a Figura 18 conclui-se que à medida que se aumenta o percentual de resíduo sólido de laboratório há uma diminuição no percentual de sólidos totais fixos. Os maiores percentuais de SFT encontram-se nos cantos inferiores esquerdo e direito da Figura 18 nas tonalidades verde mais escuros, sendo equivalentes aos materiais que contém 10% de RSL em sua composição, tanto na menor temperatura (6°C) quanto na maior temperatura (50°C).

Da mesma forma, à medida que aumenta o percentual de RSL e temperatura de cura, ocorre uma redução no percentual de STF como pode ser observado na Figura 18, no tratamento submetido a temperatura de cura de 50°C e com 45% de RSL em sua composição, atingindo um percentual de 96% de STF.

Brasil (2019) ao realizar a análise de sólidos totais fixos em materiais E/S submetidos a diferentes temperaturas de cura e diferentes percentuais de RSL observou-se que a medida que aumentava o percentual de RSL ocorria uma redução no teor de STF.

Nesse caso, utilizando o percentual de 30% de RSL e temperatura de cura de 6°C obteve-se um teor de 90,59% de STF e com temperatura de cura de 22°C e 10% de RSL na composição do material E/S atingiu um percentual de 97,47% de STF.

Bandeira (2010) calculou o percentual de STF em materiais E/S submetidos a diferentes temperaturas de cura (0°C, 20°C e 40°C) e diferentes percentuais de resíduo sólido (10%, 15%

e 20%), obtendo o maior percentual de STF (91,96%) no tratamento submetido a temperatura de cura de 0°C e com 10% de resíduo sólido em sua composição.

Em contrapartida, o menor percentual de STF (88,23%) foi obtido no tratamento composto com 20% de resíduo sólido e com temperatura de cura de 40°C.

Como pode-se observar, os resultados obtidos nesta pesquisa seguem o mesmo raciocínio encontrado em outras pesquisas realizadas com diferentes temperaturas de cura e diferentes percentuais de resíduos sólidos, demonstrando que à medida que aumenta a porcentagem de resíduo e aumenta a temperatura de cura, diminui o teor de STF.

#### 4.2.4.5. Análise Variância (ANOVA): Sólidos Totais Voláteis

A Tabela 24 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de sólidos totais voláteis dos materiais E/S.

Tabela 24- Análise de variância dos resultados de Sólidos totais voláteis dos materiais E/S.

| FONTE        | GL | SQ      | QM      | VALOR F | VALOR-P      |
|--------------|----|---------|---------|---------|--------------|
| Linear       | 2  | 1,71090 | 0,85545 | 0,64    | <b>0,609</b> |
| T (°C)       | 1  | 0,60840 | 0,60840 | 0,46    | <b>0,569</b> |
| % RSL        | 1  | 1,10250 | 1,10250 | 0,83    | <b>0,459</b> |
| T (°C)*% RSL | 1  | 0,90250 | 0,90250 | 0,68    | <b>0,497</b> |
| Curvatura    | 1  | 0,00550 | 0,00550 | 0,00    | <b>0,955</b> |
| Erro         | 2  | 2,66667 | 1,33333 |         |              |
| Total        | 6  | 5,28557 |         |         |              |

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSL: Resíduo sólido de laboratório; T: Temperatura

\* Valor  $P$ :  $p \leq 0,05$  médias significativamente diferentes,  $p > 0,05$  diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 24, as análises de variância dos sólidos totais voláteis mostram que os valores de  $p$  para a temperatura, porcentagem de RSL e a interação entre os dois fatores foram respectivamente 0,569; 0,459 e 0,497. Esses valores foram maiores que o nível de significância adotado ( $p \leq 0,05$ ).

Com isso, pode-se afirmar que a diferença estatística para os sólidos totais voláteis não foi significativa entre os tratamentos utilizados. Como o valor de  $p$  para a curvatura foi 0,955 pode-se afirmar que o modelo que melhor representa os dados é o modelo linear. Pode se afirmar com 95% de confiança que os fatores porcentagem e temperatura de cura e a interação não influenciaram no teor de sólidos totais fixos.

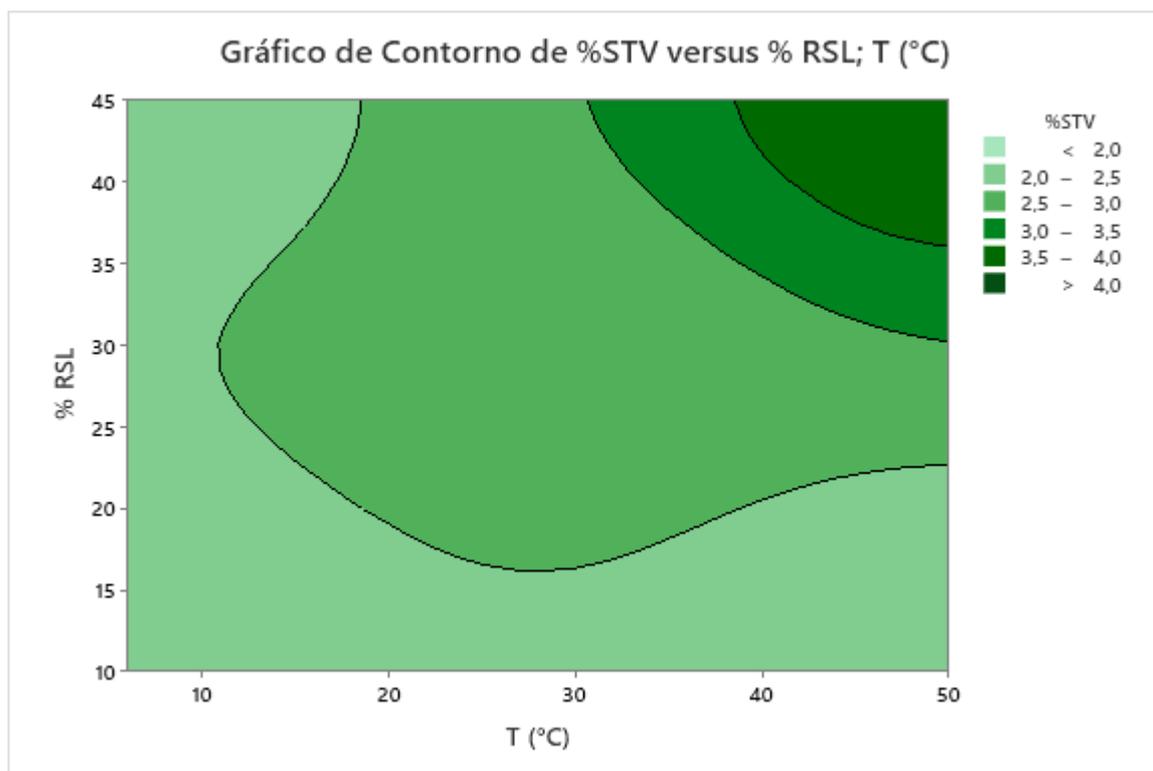
#### 4.2.4.6. Modelo e Gráfico para o teor de Sólidos Totais voláteis

Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos sólidos totais voláteis (STV) em função da temperatura e do percentual de RSL, obteve-se o perfil representado na equação 25. Da mesma forma que ocorreu com STF, o valor de  $R^2$  foi igual a 49,55% indicando que o modelo abaixo (EQ x) não foi preditivo.

$$\%STV = 2,24 - 0,0162 T (^{\circ}C) - 0,0045 \% RSL + 0,00123 T (^{\circ}C) * \% RSL + 0,057 Pt Ct \quad \text{Eq (25)}$$

O gráfico obtido para o teor de sólidos totais voláteis está apresentado na Figura 19.

Figura 19- Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para os STV.



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Analisando a Figura 19, observa-se que à medida que aumenta o percentual de resíduo sólido de laboratório e a temperatura de cura, há um aumento no percentual de sólidos totais voláteis. O maior percentual de SFV encontra-se na parte superior direita da Figura 19, apresentando tonalidade verde mais escura. Esse resultado é equivalente principalmente aos materiais que contém 45% de RSL em sua composição e tiveram temperatura de cura de 50°C.

Da mesma forma, à medida que diminui o percentual de RSL ocorre uma redução no percentual de STV como pode ser observado na figura acima no tratamento submetido a temperatura de cura de 50°C e com 10% de RSL em sua composição, atingindo um percentual de 2% de STV.

Pode-se observar que os valores dos percentuais de STV são obtidos nas situações opostas dos resultados dos STF, tendo em vista que eles representam o percentual de material orgânico e inorgânico presente no material E/S.

Brasil (2019) ao realizar a análise de sólidos totais voláteis em materiais E/S submetidos a diferentes temperaturas de cura e diferentes percentuais de RSL observou que à medida que aumentava o percentual de RSL ocorria um aumento no teor de STV. Nesse caso, utilizando o percentual de 30% de RSL e temperatura de cura de 22°C obteve-se um teor de 2,69% de STV e com temperatura de cura de 6°C e 10% de RSL na composição do material E/S atingiu o menor percentual de STV (1,37%).

Bandeira (2010) realizou um estudo sobre o percentual de STV presentes em materiais E/S submetidos a diferentes temperaturas de cura (0°C, 20°C e 40°C) e diferentes percentuais de resíduo sólido (10%, 15% e 20%), obtendo o maior percentual de STV (11,75%) no tratamento submetido a temperatura de cura de 40°C e com 20% de resíduo sólido em sua composição. Em contrapartida, o menor percentual de STV (8,02%) foi obtido no tratamento composto com 10% de resíduo sólido e com temperatura de cura de 0°C.

Como isso, é possível afirmar que à medida que aumenta a temperatura de cura e o percentual de RSL, têm-se um aumento no teor de material inorgânico e a redução desses fatores ocasiona uma redução no percentual de STV do material E/S.

Como foi apresentado acima, os resultados obtidos nesta pesquisa seguem padrões semelhantes a resultados obtidos em outras pesquisas realizadas com diferentes temperaturas de cura e diferentes percentuais de resíduos sólidos, demonstrando que à medida que aumenta a porcentagem de resíduo e aumenta a temperatura de cura, têm-se um aumento no teor de STV.

#### 4.2.5 ANÁLISE DE PH

Na Tabela 25 estão apresentados os resultados das análises de pH após os tratamentos com diferentes porcentagens de Resíduo Sólido de Laboratório e submetidos a diferentes temperaturas de cura com adição de 3 pontos centais.

Tabela 25- Respostas das análises de pH dos produtos formados pela E/S.

| Experimento      | Fator codificado Temperatura de Cura | Fator codificado Porcentagem de RSL | Valor Real da Temperatura de Cura(°C) | Valor Real da Porcentagem de RSL(%) | Variável Resposta pH |
|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Exp <sub>1</sub> | -1                                   | -1                                  | 6                                     | 10                                  | 11,09                |
| Exp <sub>2</sub> | +1                                   | -1                                  | 50                                    | 10                                  | 11,54                |
| Exp <sub>3</sub> | -1                                   | +1                                  | 6                                     | 45                                  | 10,77                |
| Exp <sub>4</sub> | +1                                   | +1                                  | 50                                    | 45                                  | 10,69                |
| Exp <sub>5</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | 11,17                |
| Exp <sub>6</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | 11,11                |
| Exp <sub>7</sub> | 0                                    | 0                                   | 28                                    | 27,5                                | 11,25                |

Fonte: Autor, (2021).

Analisando os valores de pH obtidos na Tabela 25 referentes aos tratamentos realizados anteriormente é possível observar que todos os tratamentos possuem um caráter alcalino, tendo em vista que todos valores de pH se encontram numa faixa entre 10,69 a 11,54. Este caráter alcalino acontece devido a presença do cimento utilizado como aglomerante nos tratamentos do RSL, o qual possui um pH de aproximadamente 12,08.

É possível observar na Tabela 25 à medida que aumenta a porcentagem de resíduo ocorre uma redução no valor do pH. Isso pode acontecer devido o teor ácido do RSL que é de 6,21, logo aumentando a sua concentração vai ocorrer a redução do pH no final do tratamento.

#### 4.2.5.1. Análise Variância (ANOVA): pH

A Tabela 26 mostra a ANOVA para os resultados do ensaio de pH dos materiais E/S, baseado nos resultados apresentados na Tabela 25.

Tabela 26- Análise de variância dos resultados de pH.

| Fonte              | GL | SQ       | QM       | Valor F | Valor-P      |
|--------------------|----|----------|----------|---------|--------------|
| <b>Linear</b>      | 2  | 0,376450 | 0,188225 | 38,15   | <b>0,026</b> |
| <b>T(°C)</b>       | 1  | 0,034225 | 0,034225 | 6,94    | <b>0,119</b> |
| <b>% RSL</b>       | 1  | 0,342225 | 0,342225 | 69,37   | <b>0,014</b> |
| <b>T(°C)*% RSL</b> | 1  | 0,070225 | 0,070225 | 14,23   | <b>0,064</b> |
| <b>Curvatura</b>   | 1  | 0,040744 | 0,040744 | 8,26    | <b>0,103</b> |
| <b>Erro</b>        | 2  | 0,009867 | 0,004933 |         |              |
| <b>Total</b>       | 6  | 0,497286 |          |         |              |

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSL: Resíduo sólido de laboratório; T: Temperatura\* Valor P:  $p \leq 0,05$  médias significativamente diferentes,  $p > 0,05$  diferença não significativa. Fonte: Dados da pesquisa (2021)

De acordo com os dados apresentados na Tabela 26, as análises de variância do potencial hidrogênionico (pH) mostram que os valores de P para a temperatura, porcentagem de RSL e a interação entre os dois fatores foram respectivamente 0,119; 0,014 e 0,064. O valor do percentual de RSL foi menor que o nível de significância adotado ( $p \leq 0,05$ ), enquanto o valor de P para a temperatura e a interação entre os dois fatores foram maiores que o nível de significância.

Com isso, pode-se afirmar que a diferença estatística para o pH em relação à temperatura de cura e à interação entre os dois fatores não foi significativa entre os tratamentos utilizados, enquanto o percentual de RSL apresentou uma resposta estatisticamente significativa.

Visto que o valor de P para a curvatura foi 0,103 pode-se afirmar que o modelo que melhor representa os dados é o modelo linear. Pode-se afirmar com 95% de confiança que os fatores temperatura de cura e a interação não influenciaram no valor do pH.

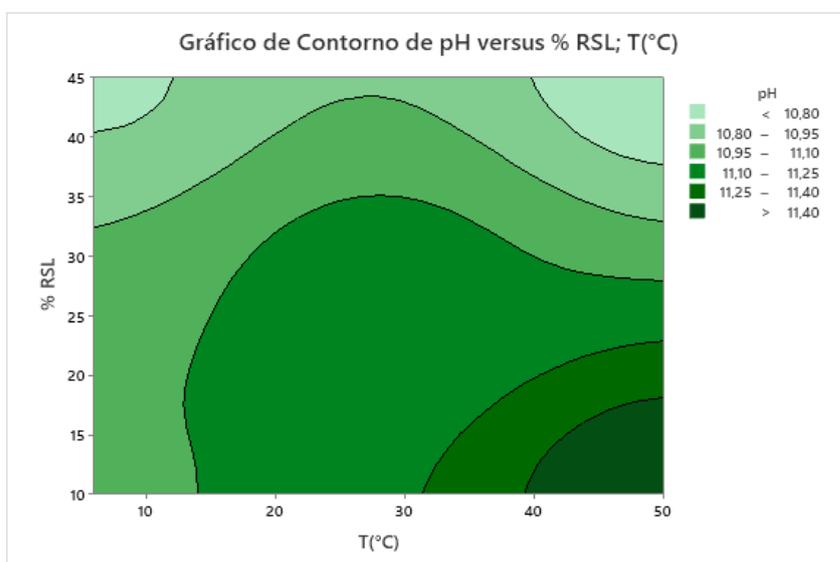
#### 4.2.5.2 Modelo e Gráfico para o percentual de pH

Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos potenciais hidrogênionicos (pHs) em função da temperatura e do percentual de RSL, obteve-se o perfil representado na equação 26.

$$\text{pH} = 11,099 + 0,01367 T(^{\circ}\text{C}) - 0,00708 \% \text{RSL} + 0,000344 T(^{\circ}\text{C}) * \% \text{RSL} + 0,1542 \text{ Pt Ct Eq (26)}$$

O gráfico obtido para os valores de pH está apresentado na Figura 20.

Figura 20- Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para pH.



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Analisando a figura 20 pode-se observar que os maiores valores de pH se encontra nos experimentos compostos com o menor percentual de RSL (10%), como estar representado no canto inferior direito, na coloração verde escura. Enquanto os menores valores foram obtidos nos experimentos com o maior percentual de RSL(45%), como pode ser observado nos cantos superiores da figura 20, representados na coloração verde claro, comprovando que o percentual de RSL tem relação direta com a resposta do ensaio.

Brasil (2019) ao realizar o estudo de materiais E/S submetidos a diferentes temperaturas de cura (6°C e 22°C) e diferentes percentuais de RSL (10% e 30%), observou que os menores valores de pH foram obtidos com baixos percentuais de resíduo sólido de laboratório e com baixas temperaturas, enquanto os maiores valores de pH foram observados à medida que aumentou o percentual de RSL e a temperatura de cura dos experimentos. Paixão (2019) ao realizar a análise de pH em materiais E/S com diferentes percentuais de RSL em sua composição observou que à medida que o percentual de RSL foi aumentando, ocorreu uma redução no valor do pH, tendo em vista que o experimento com 0% de RSL o pH médio foi de 12,16, enquanto que o experimento com 20% de RSL obteve-se um pH de 11,60.

### **4.3 AVALIAÇÃO DA IMOBILIZAÇÃO DO CONTAMINANTE: DQO**

O processo de E/S é uma técnica viável bastante utilizada no tratamento de resíduos sólidos perigosos (Classe I) para convertê-lo a uma classe de menor periculosidade, ou seja, (Classe II). Para a avaliação de imobilização dos contaminantes, foi utilizado o ensaio de lixiviação e a partir do líquido lixiviado, foi determinada a concentração de DQO presente em cada experimento.

#### **4.3.1 Análise da Demanda Química de Oxigênio (DQO)**

A demanda química de oxigênio (DQO) está relacionada à quantidade de matéria orgânica presente na amostra analisada. O Ministério da Saúde conforme a Portaria nº 2914(2011) e o CONAMA Resolução 430 (2011) estabelecem como limite máximo permissível para a demanda química de oxigênio a concentração de 1000 mg.L<sup>-1</sup> ou 20000 mg.kg<sup>-1</sup> em efluentes para serem dispostos no meio ambiente. Na Tabela 27 encontram-se os resultados para o ensaio da demanda química de oxigênio para o extrato lixiviado das matrizes cimentícias, constituídas com temperaturas de cura variando de 6°C, 28°C e 50°C e porcentagem de RSL de 10%, 27,5% e 45%.

Tabela 27- Respostas do ensaio de DQO do extrato lixiviado.

| Experimento      | Valor Real da Temperatura de Cura(°C) | Valor Real Da Porcentagem de RSL(%) | Variável Resposta DQO(mg.L <sup>-1</sup> ) | Variável Resposta DQO( mg.Kg <sup>-1</sup> ) |
|------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| <b>RSL Bruto</b> | -                                     | -                                   | <b>6362,3</b>                              | <b>127245,4</b>                              |
| Exp <sub>1</sub> | 6                                     | 10                                  | 2544,9                                     | 50898,2                                      |
| Exp <sub>2</sub> | 50                                    | 10                                  | 2619,8                                     | 52395,2                                      |
| Exp <sub>3</sub> | 6                                     | 45                                  | 2806,9                                     | 56137,8                                      |
| Exp <sub>4</sub> | 50                                    | 45                                  | 3293,4                                     | 65868,2                                      |
| Exp <sub>5</sub> | 28                                    | 27,5                                | 2806,9                                     | 56137,8                                      |
| Exp <sub>6</sub> | 28                                    | 27,5                                | 2788,2                                     | 55763,5                                      |
| Exp <sub>7</sub> | 28                                    | 27,5                                | 2769,5                                     | 55389,2                                      |

LEGENDA: DQO- Demanda química de oxigênio

Fonte: Autor, (2021).

De acordo com a Tabela 27, pode-se observar que à medida que a porcentagem de RSL e a temperatura de cura aumentam, têm-se um aumento na concentração de DQO. Entretanto, o melhor resultado foi apresentado pelo tratamento utilizando a menor temperatura de cura de 6°C e a menor porcentagem de 10% de RSL (50898,2 mg.Kg<sup>-1</sup>). Em contrapartida, o experimento com maior concentração de DQO foi obtido utilizando a maior temperatura de cura (50°C) e a maior concentração de RSL(45%), atingindo uma concentração de 65868,2 mg.kg<sup>-1</sup> de DQO.

Levando em consideração os fatores estabelecidos, temperatura de cura e porcentagem de RSL, incorporado nas matrizes é possível observar que os mesmos influenciaram diretamente na resposta do ensaio elevando a concentração de DQO do extrato lixiviado. Nesse sentido Swarnalatha *et al.*(2008) afirmam que, quando ocorre a redução dos contaminantes do material após serem estabilizados ocorre devido à eficiência do processo de E/S.

Ainda na perspectiva de classificar os tratamentos em perigosos ou não perigosos, observou-se na Tabela 28 que houve uma redução significativa na concentração de DQO comparando a concentração de DQO no RSL bruto (6362,3 mg.L<sup>-1</sup>) com os demais experimentos, porém, todos os experimentos foram reprovados no parâmetro de DQO, uma vez que apresentaram concentração acima do LMP de 1000 mg.L<sup>-1</sup> estipulados pelo MS Portaria

2914 (2011) e pela Resolução CONAMA N° 430 (2011), sendo classificados como resíduos perigosos.

Desse modo, pode-se afirmar que ao submeter o RSL ao tratamento de estabilização por solidificação (E/S) houve uma redução na concentração deste resíduo comparando com a concentração de DQO obtida nos experimentos que tinham um percentual de resíduo em sua composição.

Dias (2015) realizou a análise de DQO a partir do extrato do lixiviado da borra de petróleo em experimentos submetidos a diferentes tempos de cura (7, 17,5 e 28 dias) e diferentes concentrações do contaminante (5%, 12,5% e 20%) e observou que a menor resposta para DQO foi obtida quando se incorporou 5% do resíduo para um tempo de cura de 7 dias, e a maior resposta encontrada foi para incorporação de 20% deste resíduo como tempo de cura de 7 dias, evidenciando que a porcentagem aplicada de resíduo influenciou na capacidade de lixiviação do contaminante. Em contrapartida, quando aumentou o tempo de cura das matrizes cimentícias houve uma redução considerável de DQO. Logo tanto a porcentagem de resíduo incorporado quanto o tempo de cura influenciaram na quantidade lixiviável de DQO.

Guimarães (2017) ao realizar a análise de DQO em lodo de curtume submetidos a diferentes tempos de cura (7, 28, 90 dias) e diferentes concentrações de lodo (5% 15% 25%) observou que à medida que a porcentagem de lodo aumentava, no mesmo tempo de cura, tinha-se um acréscimo na concentração de DQO. Sendo que os melhores resultados foram obtidos pelos tratamentos utilizando tempo de cura de 7 dias e porcentagem de lodo de 5%. Logo, os fatores tempo de cura e porcentagem de lodo, incorporado nas matrizes influenciaram elevando a concentração de DQO.

#### 4.3.1.1. Análise Variância (ANOVA): DQO

Tabela 28- Respostas das análises de DQO dos produtos formados pela E/S.

| Fonte              | GL | SQ        | QM       | Valor F | Valor-P      |
|--------------------|----|-----------|----------|---------|--------------|
| <b>Linear</b>      | 2  | 11905397  | 59526989 | 424,89  | <b>0,002</b> |
| <b>T(°C)</b>       | 1  | 31513628  | 31513628 | 224,94  | <b>0,004</b> |
| <b>% RSL</b>       | 1  | 87540350  | 87540350 | 624,84  | <b>0,002</b> |
| <b>T(°C)*% RSL</b> | 1  | 16947219  | 16947219 | 120,96  | <b>0,008</b> |
| <b>Curvatura</b>   | 1  | 540195    | 540195   | 3,86    | <b>0,189</b> |
| <b>Erro</b>        | 2  | 280201    | 140100   |         |              |
| <b>Total</b>       | 6  | 136821592 |          |         |              |

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSL: Resíduo sólido de laboratório; T: Temperatura

\* Valor P:  $p \leq 0,05$  médias significativamente diferentes,  $p > 0,05$  diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 28, as análises de variância da concentração de DQO mostram que os valores de  $p$  para a temperatura, porcentagem de RSL e interação foram respectivamente 0,004; 0,002; 0,008. Esses valores foram menores que o nível de significância adotado ( $p \leq 0,05$ ). Pode-se afirmar com 95% de confiança que a diferença estatística é significativa entre os tratamentos utilizados.

Para a curvatura o valor de  $p$  foi 0,189, logo, o modelo que melhor representa os dados é o modelo linear. Além disso, pode-se afirmar com 95% de confiança que os fatores porcentagem de RSL, temperatura de cura e a interação influenciaram positivamente para a lixiviação da concentração de DQO, comprovando assim a adequação do modelo.

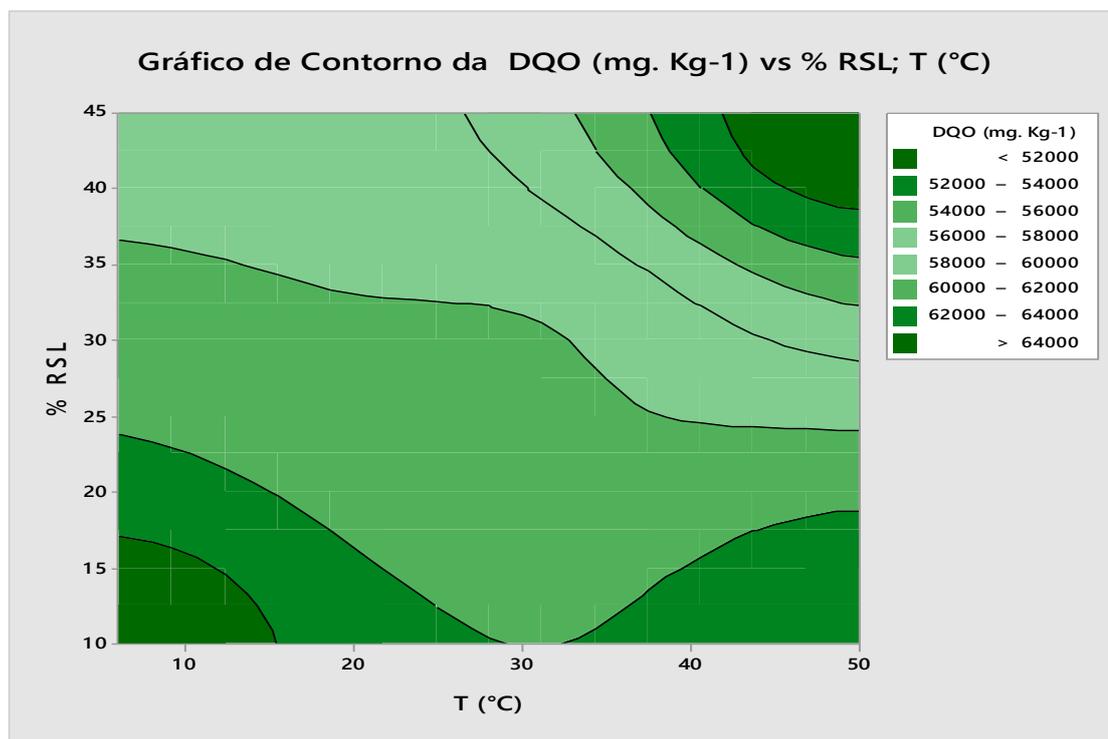
#### 4.3.1.2 Modelo e Gráfico para a concentração de DQO

Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados das concentrações de DQO em ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) em função da temperatura e do percentual de RSL, obteve-se o perfil representado na equação 27.

$$\text{DQO}(\text{mg.Kg}^{-1}) = 49518 - 19,4 T (\text{°C}) + 117,6 \% \text{ RSL} + 5,346 T (\text{°C}) * \% \text{ RSL} - 561 \text{ Ct Pt} \quad \text{Eq (27)}$$

O gráfico obtido para o ensaio de DQO está apresentado na Figura 21.

Figura 21-Superfície de contorno da temperatura em função do %RSL para DQO.



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Analisando a Figura 21 é possível observar que melhor resultado foi obtido no tratamento composto pela menor temperatura de cura e o menor percentual de RSL, 6°C e 10% respectivamente, como pode ser visualizado no canto inferior esquerdo do gráfico na coloração verde escura, enquanto o pior resultado foi obtido no tratamento com maior percentual de RSL(45%) e submetido a maior temperatura de cura (50°C), representado pela coloração verde no canto superior direito do gráfico.

Dessa forma, é estatisticamente comprovado que à medida que se aumenta a concentração de resíduo e a temperatura de cura, ocorre um aumento da demanda química de oxigênio no tratamento das matrizes cimentícias, conseqüentemente diminuindo a eficiência do processo de E/S, enquanto os melhores resultados de DQO são obtidos quando são utilizadas as menores concentrações de resíduo e menores temperaturas de cura, atingindo menores concentrações de DQO lixiviadas, aumentando a eficiência do tratamento das matrizes submetidas à técnica de E/S.

#### 4.4 BALANÇO DE MASSA E EFICIÊNCIA NA REDUÇÃO DA DQO

##### 4.4.1 Balanço de Massa dos Contaminantes

Para verificar o comportamento da redução da DQO utilizou-se do balanço de massa para a DQO. O balanço de massa foi aplicado em todos os tratamentos, conforme o método proposto por Leite (1997) e Brito (1999), obtendo as concentrações de DQO no extrato lixiviado. Na Tabela 29 estão os valores das massas do processo de E/S das matrizes cimentíceas dos tratamentos com as concentrações de DQO no extrato lixiviado para obter o balanço de massa.

Tabela 29 - Balanço de massa do processo de E/S para DQO no extrato lixiviado.

| <b>Experimento</b>     | <b>Valor real da temperatura de cura(°c)</b> | <b>Valor real da porcentagem de RSL (%)</b> | <b>Massa da DQO no RSL bruto<sup>1</sup> (g)</b> | <b>Massa da DQO tratado<sup>2</sup>(g)</b> | <b>Massa da DQO ret<sup>3</sup>(g)</b> |
|------------------------|--|---|--|--|--|
| <b>EXP<sub>1</sub></b> | 6  | 10  | 114,5  | 4,68                                       | <b>109,82</b>                          |
| <b>EXP<sub>2</sub></b> | 50   | 10  | 114,5  | 5,15                                       | <b>109,35</b>                          |
| <b>EXP<sub>3</sub></b> | 6  | 45  | 114,5  | 4,94                                       | <b>109,56</b>                          |
| <b>EXP<sub>4</sub></b> | 50   | 45  | 114,5  | 6,44                                       | <b>108,06</b>                          |
| <b>EXP<sub>5</sub></b> | 28   | 27,5  | 114,5  | 5,50                                       | <b>109,00</b>                          |
| <b>EXP<sub>6</sub></b> | 28   | 27,5  | 114,5  | 5,48                                       | <b>109,02</b>                          |
| <b>EXP<sub>7</sub></b> | 28   | 27,5  | 114,5  | 5,42                                       | <b>109,08</b>                          |

LEGENDA: (1): Massa do resíduo sólido de Laboratório bruto; (2): Massa da DQO tratado; (3): massa da DQO retida na matriz.

Fonte: Dados da pesquisa, (2021).

De acordo com a Tabela 29, pode-se observar que os menores valores para a DQO tratada a partir do extrato do lixiviado foi obtido no experimento composto com 10% de RSL e temperatura de cura de 6°C, atingindo um valor de 4,68g de massa tratada e o maior resultado foi no tratamento com 45% de RSL e temperatura de cura de 50°C com um valor de 6,44g de massa tratada.

Os melhores resultados em relação à massa retida na matriz cimentícea foram obtidos nos tratamentos submetidos à menor temperatura de cura (6°C), com percentuais de 10% e 45% de RSL em sua composição, atingindo o valor de massa do contaminante retida de 109,82g e 109,56g respectivamente. Em contrapartida, o menor resultado de massa retida foi obtido no experimento com a maior concentração de resíduo em sua composição (45%) e submetido a maior temperatura de cura (50°C), atingindo o valor de 108,06g de contaminante retida na matriz cimentícea.

Com isso, pode-se observar que todos os tratamentos retiveram uma quantidade de resíduo na matriz cimentícia, sendo que os tratamentos submetidos a menores temperaturas de cura, alcançaram um valor maior de retenção. Em relação ao percentual de RSL pode-se observar que quanto menor for o percentual de contaminante em sua composição maior será a quantidade de resíduo retida na matriz. Logo tanto a temperatura de cura quanto o percentual de resíduo influenciaram no resultado do balanço de massa dos contaminantes.

Bandeira (2010) realizou o balanço de massa do processo de E/S a partir da DQO obtida do extrato de lixiviado de resíduo sólido submetidos a diferentes temperaturas de cura ( 0°C, 20°C e 40°C) e com diferentes concentrações de resíduo ( 10%, 15% e 20%) e observou que a maior atenuação ocorreu no tratamento com temperatura de 40°C e 10% RS, sendo retidos na matriz cimentícia 84,83 g de contaminantes, em função das massas aplicadas e lixiviada, sendo que, a massa de borra a ser tratada era de 96,74 g. Já a menor retenção ocorreu no tratamento submetido a temperatura de 20°C e 15% de RS em sua composição, atingindo uma atenuação de 79,37g do resíduo na matriz cimentícia.

Dias (2015) realizou o balanço de massa do processo de E/S a partir da DQO obtida do extrato de lixiviado da borra de petróleo submetidos a diferentes tempos de cura ( 7, 17,5 e 28 dias) e com diferentes concentrações de borra ( 5%, 12,5% e 20%) e observou que a menor retenção do poluente ocorreu no tratamento com 12,5% borra e tempo de cura de 17,5 dias), sendo atenuados 23,97 mg do contaminante, enquanto a maior retenção ocorreu no tratamento submetido ao menor tempo de cura e com a menor concentração de resíduo (47,27 mg de borra).

Guimarães (2017) ao realizar o balanço de massa de E/S dos contaminantes a partir da DQO obtida do extrato de lixiviado de lodo de curtume observou que os menores valores para a DQO tratada no extrato lixiviado foram atribuídos às médias dos tratamentos com menor percentual de resíduo na composição (5%) e submetidos a diferentes tempos de cura (7, 28 e 90 dias). Os melhores resultados apresentados para a massa retida do lodo foram, apresentados nos tratamentos com menor concentração de resíduo e menor tempo de cura, restando na matriz cimentícia 10,16 g do contaminante.

Silva (2018) ao realizar o balanço de massa do processo de E/S a partir da DQO obtida do extrato de lixiviado de RSL observou que os menores valores de massa lixiviada em relação ao contaminante tratado foram atribuídos aos experimentos com a menor quantidade de RSL na composição (5%), atingindo uma retenção de 197,98g do contaminante na matriz cimentícia.

Diante disso, ao analisar os resultados obtidos na presente pesquisa e compará-los com resultados encontrados em outras pesquisas pode-se afirmar que o processo é satisfatório ao tratar resíduos sólidos perigosos.

#### 4.4.2. Eficiência de Retenção da Matéria Orgânica

A eficiência do processo é baseada em termos de retenção desses contaminantes nas matrizes cimentícias, sendo calculada a partir da Equação 11. Na Tabela 30, encontram-se os valores das massas obtidas no processo de E/S das matrizes cimentícias de todos os tratamentos com as concentrações de DQO no extrato lixiviado para obter a eficiência do processo.

Tabela 30- Eficiência de retenção da matéria orgânica (DQO) no extrato lixiviado.

| Tratamento                              | RSL (g) | Massa do CPC (g) | Massa Bruta (mg.kg <sup>-1</sup> ) | Massa Tratada (mg.kg <sup>-1</sup> ) | Eficiência (%) |
|---|---------|------------------|------------------------------------|--------------------------------------|----------------|
| <b>T01</b> <sub>T=6°C e 10%RSI</sub>    | 7,5     | 450              | 114,5                              | 4,68                                 | <b>95,84</b>   |
| <b>T02</b> <sub>T=50°C e 10%RSI</sub>   | 7,5     | 450              | 114,5                              | 5,15                                 | <b>95,42</b>   |
| <b>T03</b> <sub>T=6°C e 45%RSI</sub>    | 33,75   | 450              | 114,5                              | 4,94                                 | <b>95,36</b>   |
| <b>T04</b> <sub>T=50°C e 45%RSI</sub>   | 33,75   | 450              | 114,5                              | 6,44                                 | <b>93,95</b>   |
| <b>T05</b> <sub>T=28°C e 27,5%RSI</sub> | 20,625  | 450              | 114,5                              | 5,50                                 | <b>94,97</b>   |
| <b>T06</b> <sub>T=28°C e 27,5%RSI</sub> | 20,625  | 450              | 114,5                              | 5,48                                 | <b>94,99</b>   |
| <b>T07</b> <sub>T=28°C e 27,5%RSI</sub> | 20,625  | 450              | 114,5                              | 5,42                                 | <b>95,05</b>   |

LEGENDA: RSL: Resíduo Sólido de Laboratório; CPC: Corpo de Prova.

Fonte: Dados da pesquisa, (2021).

De acordo com a Tabela 30, pode-se observar que todos os tratamentos realizados apresentaram eficiência na retenção do resíduo na matriz cimentícia, reduzindo a lixiviação do RSL para o meio ambiente. O tratamento com menor percentual de resíduo e menor temperatura de cura apresentou a maior eficiência na imobilização do contaminante (95,84%) enquanto o experimento com maior percentual de RSL submetido à maior temperatura de cura apresentou a menor eficiência (93,95%).

Analisando individualmente a eficiência obtida nos experimentos é possível identificar que quanto menor o percentual de resíduo utilizado e menor for a temperatura de cura, maior será a eficiência no final do processo de E/S e a medida que aumenta a temperatura de cura e o percentual de resíduo, ocorre uma redução na retenção dos contaminantes presente na composição do experimento.

Isso acontece porque à medida que aumenta a quantidade de resíduo, ocorre a saturação da matriz cimentícia, conseqüentemente diminui a eficiência na retenção do RSL. Em relação à temperatura de cura, à medida que é aumentada, favorece a abertura dos poros da matriz conseqüentemente facilita a lixiviação do contaminante. Logo, tanto a temperatura de cura

quanto o percentual de resíduo utilizado influenciam diretamente na eficiência do processo de E/S.

Bandeira (2010) ao calcular a eficiência de retenção de resíduo sólido do processo de E/S a partir da DQO do extrato de lixiviado em experimentos submetidos à diferentes temperaturas de cura e diferentes percentuais de resíduo observou uma diminuição significativa na lixiviação do resíduo após a E/S, acima de 70%, comparando-se com a borra bruta, sem tratamento (382,40 mg.Kg<sup>-1</sup>). Sendo o tratamento com menor percentual de resíduo (10%) e com temperatura de cura de 40°C que obteve o maior percentual de eficiência de retenção (85,27%). A menor eficiência (66,11%) foi obtida no tratamento com maior percentual de resíduo (20%), e maior temperatura de cura (40°C).

Dias (2015) calculou a eficiência do processo de E/S a partir da DQO obtida do extrato de lixiviado da borra de petróleo submetidos a diferentes tempos de cura (7,17,5 e 28 dias) e com diferentes concentrações de borra (5%, 12,5% e 20%) e observou que o tratamento com menor percentual de resíduo e menor tempo de cura apresentou o maior percentual de eficiência de retenção (84,7%), nas matrizes cimentícias. O tratamento que apresentou menor percentual de retenção (62%), foi o tratamento incorporado com maior percentual do poluente. Logo, a medida que aumenta a massa do resíduo, a eficiência de retenção diminui, isto porque contaminantes orgânicos podem afetar a cura das matrizes cimentícias, podendo ser absorvidos pela superfície de cimento e afetar a cinética de hidratação.

Guimarães (2017) calculou a eficiência de retenção do processo de E/S do lodo de curtume a partir da DQO obtida do extrato de lixiviado submetidos a diferentes tempos de cura (7, 28, 90 dias) e diferentes percentuais de resíduo (5%, 15% e 25%) e observou que os melhores resultados apresentados para a eficiência do processo de E/S foram apresentados pelos tratamentos com menor tempo de cura e menor percentual de resíduo atingindo uma eficiência de retenção do resíduo na matriz cimentícia de 96,9%. Já a menor eficiência de retenção (65%), foi obtida nos tratamentos com maior percentual de resíduo e maior tempo de cura.

Silva (2018) calculou a eficiência do processo de E/S a partir da DQO obtida do extrato de lixiviado de RSL, onde os experimentos foram submetidos a diferentes percentuais de RSL(5%, 20%, 35%) e observou que os melhores resultados apresentados para a eficiência do processo de E/S foram apresentados pelos experimentos com menor percentual de RSL em sua composição, chegando a uma eficiência de 99,27% enquanto a menor eficiência de retenção (93,88%) foi obtida nos tratamentos compostos com a maior porcentagem de RSL.

Ao analisar os resultados obtidos na presente pesquisa com os resultados alcançados por outros autores percebe-se os experimentos atingiram uma alta eficiência na retenção do RSL nas matrizes cimentíceas.

## 5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que:

- O cimento, areia e RSL apresentaram elevado teor de sólidos totais.
- A temperatura de Cura e o percentual de RSL influenciaram na resposta dos ensaios realizados de U/S, CAA e RC, pois as matrizes com o mesmo percentual de RSL submetidos a diferentes temperaturas de cura obtiveram resultados com considerável diferença e o aumento do percentual de RSL diminuiu a integridade e durabilidade dos ensaios.
- As matrizes cimentícias preparadas com elevada concentração de RSL no presente trabalho não foram aprovadas em todos critérios de integridade e durabilidade.
- À medida que a porcentagem de RSL e a temperatura de cura aumentaram, teve um aumento na concentração de DQO, obtendo o melhor resultado o tratamento utilizando a menor temperatura de cura de 6°C e a menor porcentagem de 10% de RSL (50898,2 mg.kg<sup>-1</sup>). Em contrapartida, o experimento com maior concentração de DQO foi obtido utilizando a maior temperatura de cura (50°C) e a maior concentração de RSL(45%), atingindo uma concentração de 65868,2 mg.kg<sup>-1</sup> de DQO.
- A partir do balanço de massa observou-se que todos os tratamentos retiveram uma quantidade de resíduo na matriz cimentícia, sendo a maior retenção obtida no tratamento submetido à menor temperatura de cura e menor percentual de RSL obtendo uma retenção de massa do contaminante de 109,82g.
- Todos os tratamentos apresentaram eficiência na retenção do resíduo na matriz cimentícia, reduzindo a lixiviação do RSL para o meio ambiente, sendo que o tratamento com menor percentual de resíduo e menor temperatura de cura apresentou a maior eficiência na imobilização do contaminante (95,84%).

## REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21st ed. Washington, DC.,: APHA, 2005.

ANDRADE, M. R. A.; CUNHA, M. C. M.; BRITO, A. L. F.; MUNIZ, A. C. S.; SOUSA, B. V. **Estudo da integridade e durabilidade de materiais estabilizados por solidificação contendo lodo de curtume**. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, p. 1752-1763, Natal-RN, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7215**: Cimento portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8.419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 7p, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10.005**: Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. CENWin, Versão Digital. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT . **NBR 10.157**: Aterro de resíduos perigosos – Critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 13p, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11.174**: Armazenamento de resíduos classe II Não Inertes e III inertes. Rio de Janeiro, 7p, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13.896**: Aterros de resíduos não perigosos: Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 12p, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15.113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes. Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ALAHVERDI, M. SAVABIEASFAHANI, M. Metal Pollution in seaweed and related sediment from the Persian Gulf, Iran. *Environ Contam Toxicol*. 2012.

ALTOÉ, S. M. L.; VOESE, S. B. Gestão de resíduos da indústria do biodiesel: um estudo da criação de valor na cadeia de suprimentos. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 107-123, 2014.

APHA; AWWA; WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th edition. Washington: APHA, 1998. 1203p.

BANDEIRA, A. de A. e S. **Atenuação de Hidrocarbonetos Totais de Petróleo e Óleo Presentes em Borra de Petróleo Usando Aglomerante à Base de Cimento e Argila Organofílica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

BEN MAAOUIA, O., HAMZAOUI, R., BENNABI, A., COLIN, J., COLINA, H. Chromium stabilization and trapping in the cement matrix of recycled concrete aggregates Construction and Building Materials, Volume 191, Issue undefined, 10 December 2018.

BENASSI, L., PASQUALI, M., ZANOLETTI, A., DALIPI, R., BORGESSE, L., DEPERO, L.E., VASSURA, I., QUINA, M.J., BONTEMPI, E., 2016. Chemical stabilization of municipal solid waste incineration fly ash without any commercial chemicals: first pilot-plant scaling up. ACS Sustain. Chem. Eng. 4, 5561e5569.

BITTENCOURT, P. T. **Metodologia de elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos da UFSC campus Florianópolis**. 112f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

BRASIL, Casa Civil. Lei nº 12.305, de 2010. Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS. Brasília: Presidência da República. 2010.

BRASIL, N. B., 2019. **AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM MATERIAIS ESTABILIZADOS POR SOLIDIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE LABORATÓRIO**. Graduado. Universidade Federal de Campina Grande.

BRITO, A. L. F. Codisposição de resíduos sólidos urbanos e resíduos sólidos de indústria de curtume. 1999. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

BRITO, A. L. F; **PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO DE MATERIAIS RESULTANTES DA ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO DE RESÍDUOS**. Doutor—[s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

BRITO, A. L. F; SOARES, S.R. Avaliação da Integridade e da Retenção de Metais Pesados em Materiais Estabilizados por Solidificação. Engenharia Sanitária Ambiental, v. 14, nº 1. p. 39 – 48. Rio de Janeiro, jan/mar, ISSN 1413 – 4152, 2009.

CHAABANE, L.; MOUSSACEB, K.; AIT-MOKHTAR, A. Factors Affecting the Leaching of Heavy Metals ( $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+3}$ ) Contained in Sludge Waste Stabilization/Solidification by Hydraulic Benders, Part I: Water/Cement and Waste/Cement Ratio in S/S Mortars. Environmental Progress & Sustainable Energy, vol. 36, n.1, p. 93-103, 2017.

CHEN, Q.Y., TYRER, M., HILLS, C.D., YANG, X.M., CAREY, P., 2009b. Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: a review. Waste Manag. 29, 390e403.

CHENG, S; SHUI, Z; YU, R; ZHANG, X; ZHU, S. Durability and environment evaluation of an eco-friendly cement-based material incorporating recycled chromium containing slag. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 185, p.23-31, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.048>.

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

CONAMA – Resolução CONAMA n. 430 - Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes. Ministério do Meio Ambiente, maio de 2011.

CONNER, J.R. *Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes*. New York. Van Nostrand Reinhold, 1990. 692p.

CONNER, J.R., Hoeffner, S.L., 1998. A critical review of stabilization/solidification technology. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 28, 397e462.

CONTESSI, S., CALGARO, L., DALCONI, MC, BONETTO, A., BELLOTTO, MP, FERRARI, G., MARCOMINI, A. E ARTIOLI, G. Stabilization of lead contaminated soil with traditional and alternative binders, 2020.

CORUH, S., ERGUN, O.N., 2006. Leaching characteristics of copper flotation waste before and after vitrification. *J. Environ. Manage* 81, 333e338.

DESOGUS, P.; MANCA, P. P.; ORRÙ, G.; ZUCCA, A. Stabilization–solidification treatment of mine tailings using Portland cement, potassium dihydrogen phosphate and ferric chloride hexahydrate. *Minerals Engineering*, 45, 47-54, 2013.

Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos: Relatório de pesquisa. Brasília, 2012. Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009\\_relatorio\\_residuos\\_solidos\\_urbanos.pdf](http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf)>. Acesso em: 20 maio 2019.

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

EFING, A. C.; PAIVA, L. L. Consumo e obsolescência programada: sustentabilidade e responsabilidade do fornecedor. *Revista de Direito, Globalização e Responsabilidade nas Relações de Consumo*, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 117-135, 2016.

GUIMARÃES, A. V. A. Cinética dos Contaminantes e Otimização da Estabilização por Solidificação de Lodo de Curtume. Doutor—[s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, 2017.

GUIMARÃES, D. C. Tratamento de Lodo Primário de Estação de Tratamento de Efluentes e Aplicação de Protocolo de Avaliação. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito exigido para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. Agosto, 2008.

GUO, B., LIU, B., YANG, J., & ZHANG, S. (2017). The mechanisms of heavy metal immobilization by cementitious material treatments and thermal treatments: A review. *Journal of Environmental Management*, 193, 410–422. doi:10.1016/j.jenvman.2017.02.026.

HUANG, X., ZHUANG, R., MUHAMMAD, F., YU, L., SHIAU, Y. E LI, D. (2017). Solidificação / estabilização de resíduos de processamento de minério de cromita usando materiais cimentícios compostos ativados por álcalis. In: *Elsevier*, 1a ed. pp.300-308.

IMBROISI, Denise et al. GESTÃO DE RESÍDUOS QUÍMICOS EM UNIVERSIDADES: UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA EM FOCO. *Química Nova*, São Paulo, v. 29, n. 2, p.404409,2006.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada, 2012.

IVANOV, R.c.; LUZ, C. A.; ZOREL, H.E.; Filho, J.I. P. Behavior of calcium aluminate cement (CAC) in the presence of hexavalent chromium. *Cement And Concrete Composites*, [s.l.], v. 73, p.114-122, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.006>.

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

LI, J .; POON, C. Innovative solidification / stabilization of lead-contaminated soil using sewage sludge ash for incineration, 2017.

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

LIMA, F. S. TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDO DE LABORATÓRIO CONTENDO ZINCO E COBRE E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO. Mestre— [sl] Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

LI, X.M., BERTOS, M.F., HILLS, C.D., CAREY, P.J., SIMON, S., 2007. Accelerated carbonation of municipal solid waste incineration fly ashes. *Waste Manag.* 27, 1200e1206.

LIU, L., WANG, L., SU, S., YANG, T., DAI, Z., QING, M., ... XIANG, J. (2019). Leaching behavior of vanadium from spent SCR catalyst and its immobilization in cement-based solidification/stabilization with sulfurizing agent. *Fuel*, 243, 406–412. doi:10.1016/j.fuel.2019.01.160.

MELCHERT, M. B. M. SOLIDIFICAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CATALIZADORES CONTENDO NÍQUEL E ALUMÍNIO EM CIMENTO PORTLAND. Doutor—[s.l.] Universidade de São Paulo, 2012.

MELLADO, A., BORRACHERO, M.V., SORIANO, L., PAY A, J., MONZO, J., 2012. Immobilization of Zn(II) in Portland cement pastes. *J. Therm. Anal. Calorim.* 112, 1377e1389.

MINISTÉRIO DA SAÚDE, Portaria nº 2914 - Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, 2011.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Brasília, DF 2011.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Versão pós Audiência Pública para Conselhos Nacionais. Brasília, DF, fevereiro 2012.

MONTGOMERY, D.C; RUNGER, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 2ed. LTC editora. São Paulo, 2003, 463p.

NWOKOCHA, C. R; OWU, D. U; NWOKOCHA, M. I; UFEARO, C. S; and IWUALA, M. O. "Comparativ study on the efficacy of Allium sativum (garlic) in reducing some heavy metal accumulation in liver of wistar rats", Food and Chemical Toxicology, vol. 50, no. , pp. 222-226, 2012.

OLIVEIRA, M. J. **Tratamento de Resíduos Sólidos Perigosos e Avaliação dos Materiais Estabilizados por Solidificação**. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia química). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2012.

OLIVEIRA, P. S. **Caracterização do resíduo de resina epóxi com fibra de vidro proveniente da fabricação de pás eólicas e sua incorporação em argamassa de cimento Portland**. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba-SP, 2017.

PAIXÃO, J. F. F. Modelagem do processo de difusão de metais pesados Presentes em Resíduos após o tratamento de estabilização por solidificação (E / S). Mestre - [sl] Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

PENATTI, F.E.; GUIMARÃES, S.T.L.; SILVA, P.M. da; Gerenciamento de Resíduos químicos em Laboratório de Análise e Pesquisa: O desenvolvimento do Sistema em Laboratórios da área química. In: WORKSHOP INTERNACIONAL EM INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE–WIPIS, 2. SÃO CARLOS. 2011.

PEREIRA, S. S.; CURI, R. C. Modelos de gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos: a importância dos catadores de materiais recicláveis no processo de gestão ambiental. In: LIRA, W. S.; CÂNDIDO, G. A. Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa. Campina Grande: EDUEPB, 2013, pp. 149-172.

PINTO, C.A.; et al. Evaluation of S/S processo f tannery waste in cement by structural and mechanical analysis. Mat. Sci. Forum. V. 660-661, p. 1130-1136, 2010.

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/política-de-residuos-solidos>. Acesso em 12 de Novembro de 2019.

RICHARDSON, I.G., 2008. The calcium silicate hydrates. Cem. Concr. Res. 38, 137e158.

ROCHA, C. O. **Tratamento e Avaliação de Resíduos Sólidos Perigosos após estabilização por Solidificação (E/S)**. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2010.

ROSE, J., MOULIN, I., HAZEMANN, J.L., MASION, A., BERTSCH, P.M., BOTTERO, J.Y., MOSNIER, F., HAEHNEL, C., 2000. X-ray absorption spectroscopy study of immobilization processes for heavy metals in calcium silicate hydrates: 1. Case of lead. *Langmuir* 16, 9900e9906.

ROSE, J., MOULIN, I., MASION, A., BERTSCH, P.M., WIESNER, M.R., BOTTERO, J.Y., MOSNIER, F., HAEHNEL, C., 2001. X-ray absorption spectroscopy study of immobilization processes for heavy metals in calcium silicate hydrates. 2. Zinc. *Langmuir* 17, 3658e3665.

ROTH, C. G.; GARCIAS, C. M. **A influência dos padrões de consumo na geração de resíduos sólidos dentro do sistema urbano**. REDES, Santa Cruz do Sul, v. 13, n. 3, p. 5 -13, 2008.

SHI, C., SPENCE, R., 2004. Designing of cement-based formula for solidification/stabilization of hazardous, radioactive, and mixed wastes. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 34, 391e417.

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, p. 391 – 417, 2005.

SHI, H.-S., KAN, L.-L., 2009a. Characteristics of municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash cement matrices and effect of mineral admixtures on composite system. *Constr. Build. Mater.* 23, 2160e2166

SILVA, A. R. B.; **Avaliação Morfológica e Elemental num Modelo Experimental de Intoxicação com Metais Pesados**. 2014, 139 f.; Dissertação de Mestrado em Química Forense. Universidade de Coimbra, 2014.

SILVA, P. P. **Avaliação do Cromo Contido em Resíduo Sólido de Laboratório e Materiais Solidificados e Estabilizados para Confecção de Blocos**. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

SLORGON, J. G.; BERTOLI, R. F.; GOMES, M. C. S.; MENEZES, M. L. Utilização de Resíduo Sólido Industrial na fabricação de blocos de concreto para pavimentação: Estudo do comportamento físico, químico e mecânico da matriz cimentícia. 8º Fórum internacional de Resíduos Sólidos, Curitiba-PR, 2017.

SOBIEKA, E.; OBRANIAK, A.; ANTIZAR-LADISLAO, B. Influence of mixture ratio and pH to solidification/stabilization process of hospital solid waste incineration ash in Portland cement. *Chemosphere*, 111, 18–23, 2014.

SOUSA, S. M., BRITO, A. L.F. Modelagem, Otimização e Simulação da Integridade de Materiais Solidificados Contendo Resíduos Sólidos Industriais In: CONGRESSO DE

INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, 8., 2011, Campina Grande – Paraíba. Anais Campina Grande – Paraíba: 2017

SOROKA, I., 1979. Portland Cement Paste and Concrete. Macmillan.

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

STUMM, A., GARBEV, K., BEUCHLE, G., BLACK, L., STEMMERMANN, P., NÜESCH, R., 2005. Incorporation of zinc into calcium silicate hydrates, Part I: formation of C-S-H(I) with C/S<sup>1/2</sup>/3 and its isochemical counterpart gyrolite. Cem. Concr. Res. 35, 1665e1675.

SWARNALATHA, S. et al., Safe Disposal of Toxic Chrome Buffing Dust Generated from Leather Industries. Journal of Hazardous Materials, v. 150, 2008, p. 290 – 299.

TAYLOR, H.F.W., 1997. Cement Chemistry. Thomas Telford.

TOMMASEO, C.E., KERSTEN, M., 2002. Aqueous solubility diagrams for cementitious waste stabilization systems. 3. Mechanism of zinc immobilization by calcium silicate hydrate. Environ. Sci. Technol. 36, 2919e2925.

UCAROGLU, S., TALINLI, L., 2012. Recovery and safer disposal of phosphate coating sludge by solidification/stabilization. J. Environ. Manage 105, 131e137.

UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. USEPA - Guide to the Disposal of Chemically Stabilized and Solidified Waste. Washington, D.C., 1988.

VENZON, J. S.; CHICATTO, J. A.; VEGINI, A. A.; TAVARES, L. B. B. Resíduos Sólidos Industriais e seu potencial para a produção de compósitos – uma revisão de literatura, 2018.

VESPA, M., DAHN, R., WIELAND, E., 2014. Competition behaviour of metal uptake in cementitious systems: an XRD and EXAFS investigation of Nd- and Zn-loaded 11Å tobermorite. Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C 70e71, 32e38.

VIEIRA, P.L.; BELTRAME, L.T.C. EDUCAÇÃO AMBIENTAL: A RESPOSTA PARA O PROBLEMA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. In: TULLIO, L. Gestão de Resíduos Sólidos. Tradução. 3. ed. Belo Horizonte: Atena Editora, 2019. p. 13-24.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2 ed – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WANG, F., SHEN, Z., LIU, R., ZHANG, Y., XU, J. E AL-TABBAA, A. GMCs stabilized/solidified Pb/Zn contaminated soil under different curing temperature: Physical and microstructural properties, 2020.

WANG, Y.; DAI, J.; WANG, L.; TSANG, D.C.W.; POON, C. S. Influence of lead on stabilization/solidification by ordinary Portland cement and magnesium phosphate cement. **Chemosphere**, [S. l.], v. 190, p. 90-96, 8 jan. 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.114>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653517315400#!>. Acesso em: 10 dez. 2019.

WERKEMA Maria. C. C. e AGUIAR Silvio. *Análise de Regressão: Como entender o relacionamento entre as variáveis de um processo* [Livro]. - Belo Horizonte : QFCO, 1996.