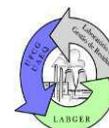




**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA**



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA - PPGEQ

LABORATÓRIO DE GESTÃO AMBIENTAL E TRATAMENTO DE RESÍDUOS - LABGER

MYLENA MARIA DIAS DE OLIVEIRA SILVA

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS MATERIAIS ESTABILIZADOS POR
SOLIDIFICAÇÃO APÓS INCORPORAÇÃO DO LODO DE INDÚSTRIA DE CURTUME
EM MATRIZ DE CIMENTO**

Campina Grande - PB
Março de 2023

MYLENA MARIA DIAS DE OLIVEIRA SILVA

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS MATERIAIS ESTABILIZADOS POR
SOLIDIFICAÇÃO APÓS INCORPORAÇÃO DO LODO DE INDÚSTRIA DE
CURTUME EM MATRIZ DE CIMENTO**

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 2023

S586a Silva, Mylena Maria Dias de Oliveira.

Avaliação ambiental dos materiais estabilizados por solidificação após incorporação do lodo de indústria de curtume em matriz de cimento / Mylena Maria Dias de Oliveira Silva. – Campina Grande, 2023.

97 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.

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

Referências.

1. Lodo de Curtume. 2. Estabilização por Solidificação. 3. Meio Ambiente. 4. Balanço de Massa. I. Brito, André Luiz Fiquene de. II. Título.

CDU 628.4.045(043)

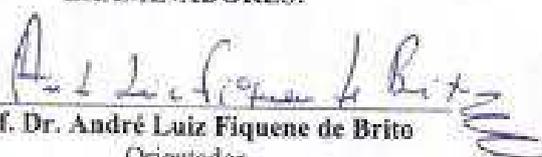
MYLENA MARIA DIAS DE OLIVEIRA SILVA

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS MATERIAIS ESTABILIZADOS POR
SOLIDIFICAÇÃO APÓS INCORPORAÇÃO DO LODO DE INDÚSTRIA DE
CURTUME EM MATRIZ DE CIMENTO**

Dissertação apresenta da 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.

Aprovado em 31 / 03 / 2023

EXAMINADORES:



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



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



Prof. Dr. Joelma Dias
Examinadora Externa
Instituto Nacional do Semiárido - INSA

Campina Grande – PB
Março de 2023

AGRADECIMENTOS

- Agradeço primeiramente a Deus, pois acredito que sem ele em minha vida coisas boas não seriam possíveis de acontecer.
- A toda minha família e amigos.
- Aos meus amigos com quem convivi durante essa jornada.
- Aos meus amigos e companheiros de mestrado.
- 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 da 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 e conhecimentos.
- A Prof^a. Dra. Joelma Dias por ter aceitado o convite de participar da banca examinadora e colaborar com suas sugestões e conhecimentos.
- AUFCG, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química e a todos os professores pela formação proporcionada.
- ACAPES pela concessão da bolsa de mestrado.
- Dedico esta dissertação à minha mãe Girlane Dias de Oliveira (*in memoriam*) e ao meu pai José Ronildo da Silva (*in memoriam*), com todo meu amor e gratidão.

RESUMO

A produção do couro vem aumentando cada vez mais e na sua fabricação ocorre uma alta geração de resíduos sólidos. O lodo de curtume é classificado como resíduo perigoso de classe I porque apresenta em sua composição metais pesados (principalmente o cromo), devido às substâncias químicas adicionadas na etapa de curtimento. O cromo está presente no lodo e em grandes quantidades é muito prejudicial aos seres vivos. É preciso que seja realizado um tratamento no lodo de curtume antes que ele seja descartado de forma inadequada. Uma alternativa é a estabilização por solidificação, que estabiliza o metal pesado em matriz de cimento. O presente trabalho teve como objetivo realizar o tratamento dos resíduos sólidos de lodo de curtume (RSLC), sendo avaliado pelas análises de integridade/durabilidade e imobilização do contaminante cromo. Foi usado a técnica de estabilização por solidificação, em matrizes de cimento submetidas a diferentes tempos de cura (t) e diferentes percentagens de RSLC (%). Foi aplicado o planejamento fatorial tipo b^k (fatorial) com adição de três repetições no ponto central (PtCt), composto por dois fatores: tempo (7, 17,5 e 28 dias) e porcentagem do lodo de curtume (10, 20 e 30%). Foram realizados 7 experimentos. Foram produzidos os corpos de provas e em seguida realizadas as caracterizações tais como: umidade, sólidos totais e suas frações, e pH. Em seguida foram realizadas as análises de resistência à compressão (RC), capacidade de absorção de água (CAA), umidificação e secagem (U/S), cromo total e demanda química do oxigênio (DQO). O resíduo sólido do lodo de curtume tratado tem valores de sólidos totais que variaram de 97,64 a 98,92%. Com base nas análises realizadas foi possível observar que todos os experimentos obtiveram valores maiores que 1 MPa em relação à resistência a compressão, portanto todos estão aprovados no ensaio de integridade com valores de 12,690 a 19,384MPa. Nos ensaios de durabilidade (CAA e U/S) também foram aprovadas tendo seus resultados dentro dos valores propostos pelas Normas. Foi comprovado o tratamento no ensaio de DQO, onde o valor do bruto foi de 61.580 mg.kg^{-1} , e o menor e maior valor para os experimentos tratados foram de 23.382 e 41.790 mg.kg^{-1} respectivamente, o tempo e a porcentagem de RSLC não tiveram influência significativa. No balanço de massa observou-se que todos os tratamentos tiveram retenção do resíduo na matriz cimentícia nos três ensaios analisados (DQO, STV e Cromo total), sendo as maiores retenções obtidas nos tratamentos submetidos à menor tempo de cura e menor percentual de RSL. Todos os experimentos apresentaram eficiência na retenção do resíduo na matriz cimentícia, reduzindo a lixiviação do resíduo para o meio ambiente, os tratamentos com menor tempo de cura e menor percentual de resíduo apresentaram as maiores eficiências na retenção do contaminante. O tratamento com 10% de lodo de curtume representa a melhor rota de disposição.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de curtume, Estabilização por solidificação, Meio ambiente, Balanço de massa.

ABSTRACT

Leather production has been increasing more and more and in its manufacture there is a high generation of solid waste. Tannery sludge is classified as class I hazardous waste because it contains heavy metals (mainly chromium) in its composition, due to the chemical substances added in the tanning step. Chromium is present in sludge and in large quantities is very harmful to living beings. It is necessary that a treatment be carried out on the tannery sludge before it is disposed of improperly. An alternative is solidification stabilization, which stabilizes the heavy metal in a cement matrix. The objective of this work was to carry out the treatment of solid waste from tannery sludge (RSLC), being evaluated by analyzes of integrity/durability and immobilization of the chromium contaminant. The technique of stabilization by solidification was used, in cement matrices subjected to different curing times (t) and different percentages of RSLC (%). The factorial design type bk (factorial) was applied with the addition of three repetitions at the central point (PtCt), composed of two factors: time (7, 17.5 and 28 days) and percentage of tannery sludge (10, 20 and 30 %). Seven experiments were carried out. The specimens were produced and then characterizations were performed, such as: humidity, total solids and their fractions, and pH. Then, compressive strength (RC), water absorption capacity (WAC), humidification and drying (U/S), total chromium and chemical oxygen demand (COD) analyzes were carried out. The solid residue of the treated tannery sludge has total solids values that ranged from 97.64 to 98.92%. Based on the analyzes carried out, it was possible to observe that all experiments obtained values greater than 1 MPa in relation to compressive strength, therefore all are approved in the integrity test with values from 12.690 to 19.384 MPa. The durability tests (CAA and U/S) were also approved, with results within the values proposed by the Standards. The treatment was confirmed in the COD test, where the gross value was 61,580 mg.kg⁻¹, and the lowest and highest value for the treated experiments were 23,382 and 41,790 mg.kg⁻¹, respectively, the time and the percentage of RSLC had no significant influence. In the mass balance, it was observed that all treatments had residue retention in the cementitious matrix in the three tests analyzed (COD, STV and total chromium), with the highest retentions obtained in treatments submitted to shorter curing time and lower percentage of RSL. All experiments showed efficiency in retaining the residue in the cementitious matrix, reducing the leaching of the residue into the environment. The treatments with the shortest curing time and the lowest percentage of residue showed the greatest efficiencies in retaining the contaminant. Treatment with 10% tannery sludge represents the best disposal route.

KEYWORDS: Tannery sludge, Stabilization by solidification, Environment, Mass balance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Critérios para classificação dos resíduos sólidos.....	17
Figura 2 - Esquema de estabilização por solidificação em matriz de cimento Portland	23
Figura 3 - Materiais e corpos de prova confeccionados para a pesquisa.....	35
Figura 4 - Equipamento de resistência à compressão.....	36
Figura 5 - Ensaio de Capacidade de absorção de água.....	37
Figura 6 - Realização do ensaio de Umidificação/Secagem.....	39
Figura 7 - Fluxograma de Avaliação de Materiais Estabilizados por Solidificação.	46
Figura 8 - Superfície de contorno do tempo em função da %RSLC para ST.....	51
Figura 9 - Superfície de contorno do tempo em função da %RSLC para STF.	53
Figura 10 - Superfície de contorno do tempo em função da %RSLC para STV.....	55
Figura 11 - Superfície de contorno do tempo em função da %RSLC para pH	57
Figura 12 - Superfície de contorno do tempo em função da %RSLC para RC.....	63
Figura 13 - Superfície de contorno do tempo em função do %RSLC para CAA.....	66
Figura 14 - Superfície de contorno da temperatura em função da %RSLC para U/S	70
Figura 15 - Superfície de contorno do tempo em função do %RSLC para DQO	74
Figura 16 - Superfície de contorno do tempo em função do %RSLC para cromo.....	77
Figura 17 - Fluxograma de Rotas de destinação final	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química do Lodo de Curtume	19
Tabela 2 - Quantidade de insumos utilizados no curtimento de peles em dois curtumes, no Mato Grosso do Sul nos anos de 2004 e 2005.....	20
Tabela 3 - Concentrações de cromo nos efluentes brutos de dois curtumes, no Mato Grosso do Sul nos anos de 2004 e 2005	21
Tabela 4 - Concentração de metais lixiviados das matrizes de argamassa contendo lodo seco do tratamento de efluente de curtume com o coagulante sulfato de alumínio.	30
Tabela 5 - Concentração de metais nos lixiviados das matrizes de argamassa contendo lodo seco do tratamento de efluente de curtume com o coagulante $PG\alpha 21Ca$	30
Tabela 6 - Proporções de materiais no preparo da argamassa.....	30
Tabela 7 - Composição da Matriz Cimentícia dos Corpos de Prova.....	31
Tabela 8 - Níveis dos fatores do processo de estabilização por solidificação.....	33
Tabela 9 - Matriz de planejamento fatorial com adição de três pontos centrais.	34
Tabela 10 - Análise de variância (ANOVA)	43
Tabela 11 - Caracterização da Areia, Lodo de Curtume e do Cimento Portland Simples..	47
Tabela 12 - Sólidos totais e umidade após o tratamento do lodo de curtume através da E/S.	49
Tabela 13 - Análise de variância dos resultados de Sólidos totais dos materiais E/S..	50
Tabela 14 - Análise de variância dos resultados de STF.....	52
Tabela 15 - Análise de variância dos resultados de STV.	54
Tabela 16 - Análise de variância dos resultados de pH.....	56
Tabela 17 - Respostas do ensaio de Resistência à Compressão	58
Tabela 18 - Critérios de Integridade/Durabilidade e limite máximos permitidos.....	59

Tabela 19 - Uso do material E/S de acordo com a Resistência à Compressão.....	59
Tabela 20 - Análise de variância dos resultados de Resistência à compressão dos materiais E/S.....	61
Tabela 21 - Resultados obtidos para a capacidade de absorção de água.....	64
Tabela 22 - Análise de variância dos resultados de capacidade de absorção de água....	65
Tabela 23 - Resultados obtidos para a Umidificação e Secagem	68
Tabela 24 - Análise de variância dos resultados de umidificação e secagem	69
Tabela 25 - Resultados obtidos para Demanda Química de Oxigênio	71
Tabela 26 - Análise de variância dos resultados da demanda química de oxigênio.....	73
Tabela 27 - Resposta da análise do Teor de Cromo.	75
Tabela 28 - Limite máximo permitido para lixiviação do cromo.....	75
Tabela 29 - Análise de variância dos resultados do teor de cromo dos materiais E/S	76
Tabela 30 - Balanço de massa e eficiência do processo de E/S nos sólidos totais voláteis	78
Tabela 31 - Balanço de massa do processo de E/S para DQO no extrato lixiviado.....	79
Tabela 32 - Balanço de massa do processo de E/S para o cromo no lixiviado.	81
Tabela 33 - Eficiência de retenção dos sólidos totais voláteis..	82
Tabela 34 - Eficiência de retenção da matéria orgânica (DQO) no extrato lixiviado... ..	84
Tabela 35 - Eficiência de retenção do metal pesado cromo no extrato lixiviado	85
Tabela 36 - Classificação dos materiais E/S.....	87

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
AAS	Espectrometria de Absorção Atômica
A/C	Relação água e cimento
CAA	Capacidade de Absorção de Água
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
CH	Portlandita
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Provas
CPC	Cimento Portland Comum
DQO	Demanda Química de Oxigênio
E/S	Estabilização por Solidificação
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente
LABGER	Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos
LMP	Limite Máximo Permissível
L/S	Líquido/Sólido
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial Hidrogeniônico
PtCt	Ponto Central
R ²	Coefficiente de Determinação
RC	Resistência à Compressão
RSL	Resíduo Sólido de Laboratório
RSLC	Resíduo Sólido do Lodo de Curtume
Rpm	Rotação por minuto
UAEQ	Unidade Acadêmica de Engenharia Química
U/S	Umidificação/Secagem
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E GERAÇÃO DE LODO DE CURTUME.....	16
3.2 ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO	21
3.3 USO DE CIMENTO PARA A ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO	23
3.4 ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO DE LODO DE INDÚSTRIA DE CURTUMES	26
4. METODOLOGIA	33
4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	33
4.2 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	34
4.3 ENSAIO DE INTEGRIDADE/DURABILIDADE E IMOBILIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES.....	35
4.3.1 Resistência à compressão	35
4.3.2 Capacidade de absorção de água	37
4.3.3 Umidade e secagem	38
4.3.4 Análises Ambientais e físico químicas	39
4.3.4.1.Ensaio de DQO.....	39
4.3.4.1.Ensaio de lixiviação	40
4.4 DETERMINAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA DOS CONTAMINATES	41
4.5 EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DOS CONTAMINANTES.....	42
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	42
4.6.1 Coeficiente de determinação (R^2).....	43
4.6.2 Coeficiente de correlação entre as variáveis (R)	44
4.6.3 Percentagem máxima de variação explicável.....	44
4.7. ROTAS DE DISPOSIÇÃO	45
5.RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO, LODO DE CURTUME E AREIA	47
5.2 SÓLIDOS TOTAIS E FRAÇÕES, UMIDADE E pH DOS MATERIAIS ESTABILIZADOS POR SOLIDIFICAÇÃO.....	49
5.2.1 Análise variância (ANOVA): sólidos totais	50
5.2.1.1 Modelo e Gráfico para o teor de Sólidos Totais.....	51
5.2.2 Análise Variância (ANOVA): STF	52

5.2.2.1 Modelo de Gráfico para o teor de Sólidos Totais Fixos	53
5.2.3 Análise Variância (ANOVA): STV	54
5.2.3.1 Modelo e Gráfico para o teor de Sólidos Totais Voláteis.....	55
5.2.4 Análise Variância (ANOVA): pH	56
5.2.4.1 Modelo e Gráfico para o percentual de pH.....	57
5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	58
5.3.1 Análise variância (ANOVA): resistência à compressão.....	61
5.3.2 Modelo e gráfico para o percentual de resistência à compressão.....	62
5.4 CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	64
5.4.1 Análise Variância (ANOVA): Capacidade de absorção de água	65
5.4.2 Modelo e Gráfico para o percentual de Capacidade de absorção de água	65
5.5 UMIDIFICAÇÃO E SECAGEM	67
5.5.1 Análise Variância (ANOVA): Umidificação e Secagem	69
5.5.2 Modelo e Gráfico para o percentual de Umidificação e Secagem	69
5.6 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO).....	71
5.6.1 Análise Variância (ANOVA): DQO.....	73
5.6.2 Modelo e gráfico para a concentração de DQO	73
5.7. RESULTADO DO TEOR DE CROMO TOTAL.....	74
5.7.1 Análise variância (ANOVA): Teor de Cromo.....	76
5.7.2 Modelo e Gráfico para o percentual de teor de cromo	76
5.8. BALANÇO DE MASSA DOS CONTAMINANTES	78
5.8.1. Balanço de massa dos contaminantes - STV	78
5.8.2. Balanço de massa dos contaminantes - DQO.....	79
5.8.3 Balanço de massa dos contaminantes - Cromo	80
5.9. EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DOS CONTAMINANTES.....	82
5.9.1 Eficiência de Retenção - STV	82
5.9.2 Eficiência de Retenção – DQO.....	83
5.9.3 Eficiência de Retenção – Cromo	85
5.10 . APLICAÇÃO DO PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO E ROTAS DE DISPOSIÇÃO.....	86
6. CONCLUSÕES.....	90
REFERÊNCIAS.....	91

1. INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos sólidos é um dos principais problemas enfrentados na atualidade, isso por que, além da alta quantidade de resíduos gerados, a sua heterogeneidade reflete nas dificuldades encontradas para seu tratamento. Então são feitas diversas pesquisas aprofundadas no assunto, de modo que, as metodologias e processos aplicados sejam eficientes para a remoção de compostos presentes nos resíduos, como por exemplo, as substâncias químicas que podem apresentar caráter tóxico.

Os resíduos sólidos de acordo com a NBR 10.004/2010 são classificados em: classe I – perigosos e classe II – não perigosos, e subdivididos em classe IIA – não inertes e classe IIB – inertes; o resíduo de classe I é considerado de alta periculosidade, e este, apresenta riscos à saúde e também ao meio ambiente (ABNT NBR 10004.2004).

Um dos exemplos de alta geração de resíduos sólidos ocorre na fabricação do curtume, tendo em vista que a produção desse material vem aumentando, tanto para importação no país, como exportação. Pesquisas realizadas mostraram que o lodo de curtume é classificado como resíduo perigoso (Classe I).

Apesar da geração de renda como ponto positivo, a fabricação de curtume é considerada uma atividade que produz muitos resíduos, e estes apresentam uma alta concentração de metais pesados, além de um expressivo consumo de água. Por possuir uma elevada concentração de cromo, esse resíduo não pode ser descartado no meio ambiente, necessitando de tratamento.

Em determinadas etapas do processamento do couro, chamada de curtimento e recurtimento, são utilizadas algumas substâncias químicas. No Brasil, o elemento mais utilizado no processo é o cromo, tendo em vista a qualidade e o curto tempo de utilização comparado a outras substâncias. Esse elemento, por sua vez, para ser considerado tóxico irá depender da sua oxidação, o cromo VI por exemplo, é mais tóxico comparado ao cromo III, isso se deve ao fato do cromo VI ter maior facilidade para penetração nas células, fazendo isso, ele se transforma em cromo III por liberação de radicais livres, esses radicais são cancerígenos (ZHOU *et al*, 2021).

Portanto, uma solução eficiente e inovadora para o tratamento dos resíduos sólidos perigosos é o processo de estabilização por solidificação (E/S), que é um tipo de

tratamento bastante viável por apresentar baixo custo e aprisionar o contaminante em uma matriz de cimento, diminuindo assim sua mobilidade e toxicidade. Brito (2007), utilizou essa metodologia para tratar/reter metais pesados e, para confirmar a eficiência do tratamento com relação ao meio ambiente, obteve os resultados através de análises das propriedades químicas e mecânicas, com o objetivo de verificar valores e reações à longo prazo.

Como vantagens desse tratamento tem-se, por exemplo, a diminuição de contaminações de rios, solos, fauna e flora por resíduos perigosos. No aspecto social, a saúde humana é preservada, além do aspecto econômico, onde ocorre o reaproveitamento dos resíduos tratados em matrizes de cimento. Ou seja, esse processo tem baixo custo, fácil produção, ótimo resultado e o material fabricado podem ser utilizados em construções civis.

Em cada caso é preciso um estudo detalhado para o tratamento de E/S, isso porque, é necessário quantificar a massa a ser utilizada de cada componente: cimento, água, areia e do resíduo sólido perigoso, para que se tenha realmente o resultado de aprisionamento do contaminante e não apenas uma diluição do contaminante juntamente com o aglomerante. Neste caso, é necessário um planejamento experimental dos fatores responsáveis pela influência desse tratamento.

Atualmente existem diversos tratamentos para o lodo de curtume que eliminam ou neutralizam os poluentes, em seu estudo Amorim (2018) utilizou processo físico-químico na etapa primária onde as partículas sólidas são sedimentadas no fundo do decantador, assim formando o lodo primário, em seguida foi feito o tratamento secundário para remover a matéria orgânica, o efluente é tratado em um reator biológico, sendo formado o lodo ativado e encaminhado para a rede pública de esgotos.

A importância desta pesquisa foi tratar e atenuar o metal pesado cromo presentes no lodo de curtume, que em sua alta concentração são extremamente tóxicos para o meio ambiente e para a vida humana. Foi usada a estabilização e solidificação em matrizes de cimento.

Neste contexto a pesquisa além de tratar o lodo de curtume realizou a avaliação ambiental dos materiais obtidos após a E/S através das análises de contaminantes, como, metal pesado(cromo), demanda química de oxigênio, além dos ensaios de

integridade/durabilidade. Foi, também, realizada avaliação ambiental dos materiais obtidos em termo do balanço de massa, foi calculada a eficiência de retenção dos contaminantes e apresentado a melhor rota de disposição do material E/S.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar a avaliação ambiental e a incorporação de lodo de indústria de curtumes em matriz de cimento.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar a integridade e durabilidade dos materiais estabilizados por solidificação, tais como a resistência à compressão (RC), capacidade de absorção de água (CAA) e umidificação e secagem (U/S);
- ✓ Determinar a imobilização dos contaminantes dos materiais estabilizados por solidificação em relação ao cromo total e demanda química do oxigênio (DQO).
- ✓ Fazer o balanço de massa dos contaminantes estabilizados por solidificação, tais como: DQO, cromo total e STV;
- ✓ Determinar a eficiência após o tratamento do lodo de indústria de curtume, em relação à DQO, ao cromo total e aos STV.
- ✓ Mostrar as rotas de disposição dos materiais estabilizados por solidificação em função do cromo total além da resistência à compressão (RC), capacidade de absorção de água (CAA) e umidificação e secagem (U/S);

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

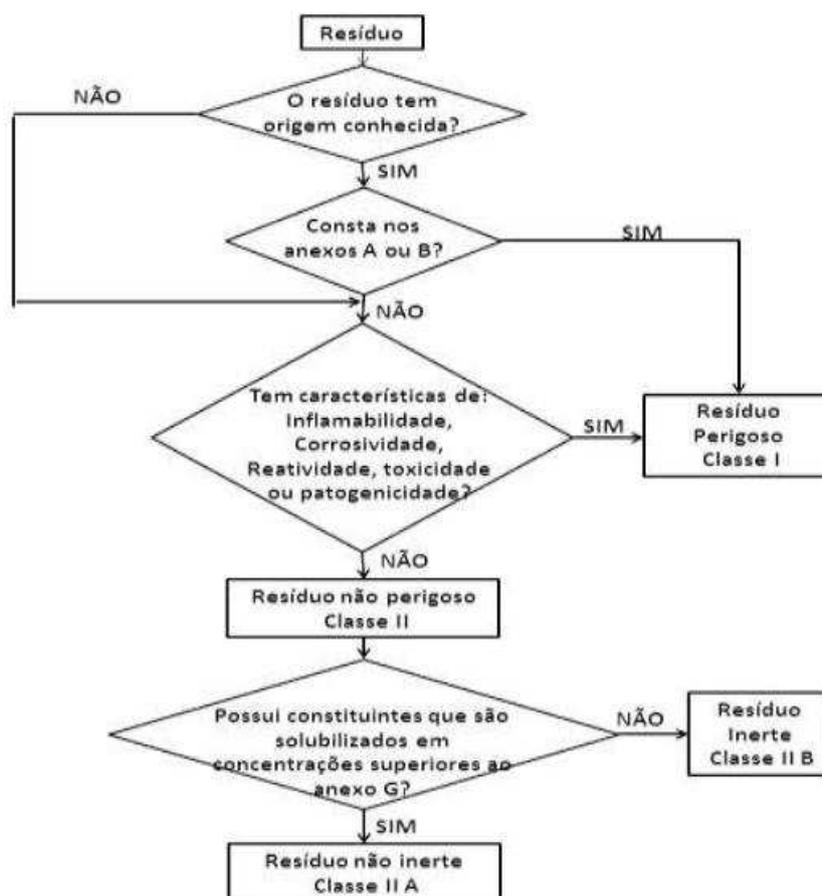
3.1. CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E GERAÇÃO DE LODO DE CURTUME

A classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade a qual eles foram originados, bem como seus constituintes e características. De acordo com a NBR 10.004/2010 considera-se resíduo sólido todo material no estado sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficando incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, esgoto, indústrias e etc, ou seja, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. Porém alguns autores ainda têm pensamento que não envolve a sustentabilidade como o de pensar que o resíduo sólido é aquilo que descartamos, ou seja, que para nós não tem mais serventia (GARCIA *et al.*, 2016).

A Classificação dos resíduos sólidos é realizada de acordo com a forma que eles foram gerados, e quais as suas causas no meio ambiente e na saúde da população. De acordo com a NBR 10004 os resíduos sólidos são classificados em: Resíduos I - Perigosos e Resíduos II - Não Perigosos (Resíduos IIA – não inertes e Resíduos IIB – inertes). A Figura 1 representa os principais critérios utilizados para a classificação dos resíduos.

Os resíduos sólidos classe I, são classificados como perigosos por acarretar problemas ambientais e de saúde pública, causando doenças e mortes, esse tipo de resíduo pode ser dividido em: inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade. Já os resíduos não perigosos de classe IIA são aqueles que são biodegradáveis e os de classe IIB são os que não oferecem risco algum ao meio ambiente. Na figura 1 mostra o critério utilizado para classificar os resíduos sólidos:

Figura 1 – Critérios para classificação dos resíduos sólidos.



Fonte: ABNT NBR 10004, 2004.

Para Arcaro *et al.* (2016) devido à alta produção dos resíduos sólidos nas indústrias, seu tratamento além de possuir um papel importante na diminuição da poluição do meio ambiente, pode trazer diversos benefícios economicamente, podendo retornar para o local a qual foi produzido. Por isso o autor considera interessante mudar o fato de o resíduo ser um problema para a indústria, e fazê-lo com que esse seja transformado em solução.

De acordo com Mello *et al.* (2016), com o grande aumento dos resíduos gerados as indústrias estão cada vez mais se preocupando em diminuir tais perdas, até porque essas são vistas como gastos, mesmo, em partes, sendo inevitável não haver os desperdícios. Os resíduos considerados perdas ou sem utilidade podem ser tratados e reaproveitados nas próprias indústrias, evitando descartes inadequados e prejuízos ao meio ambiente.

De acordo com Simões, Braga e Brito (2019), o descarte correto dos resíduos tornou-se imprescindível para que o meio ambiente seja preservado, ou pelo menos para diminuição dos impactos ambientais negativos causados. Por existirem indústrias de vários tipos, os resíduos vêm aumentando cada vez mais, esses resíduos também são variados, assim sendo necessário cada vez mais o desenvolvimento para o tratamento residual.

O descarte inadequado de resíduos sólidos pode acarretar prejuízos irreversíveis ao meio ambiente, assim, sendo necessário seguir as normas, legislações e resoluções vigentes (BELTRAME *et al.*, 2016).

De acordo com Paixão (2019) é necessário classificar primeiramente o resíduo para posteriormente decidir qual sua destinação adequada e logo em seguida seu tratamento, que irá depender de sua classificação e características.

De acordo com o Guia Técnico Ambiental do Setor de Curtume, ao final do processo denominado curtimento é gerado um resíduo denominado lodo de curtume, o qual contem partículas sólidas que são armazenadas e conseqüentemente decantadas (ALMEIDA *et al.*, 2017). Essa etapa do processo mesmo sendo importante, é a que gera diversos problemas ambientais, caso não ocorra o descarte correto do lodo. O curtimento é basicamente o processo que deixa o couro utilizável, nesse momento chamamos de wet blue, que é o resultado do curtimento com cromo, ou seja, quando o couro fica úmido e azulado/esverdeado.

O principal resíduo gerado na indústria do couro é o lodo de curtume, como é utilizada uma grande quantidade de substâncias químicas para o curtimento, o Cr III e a parte que não é utilizada do couro, constitui o lodo de curtume. O cromo III não é tóxico, mas quando descartado no meio ambiente ele pode converter-se a cromo VI, que pode causar necrose nas plantas, e mutação ou carcinogênicos em humanos e animais (ZHOU *et al.* 2021).

Segundo o Guia Técnico Ambiental do Setor de Curtume, os metais pesados presentes no lodo de curtume existem devido ao tratamento da etapa de curtimento e recurtimento, etapas essas onde são adicionadas substâncias químicas, de preferência o cromo. Como são produzidas toneladas e mais toneladas de couro, a quantidade de lodo de curtume gerada também é muito alta, assim a concentração dos metais pesados

também é elevada tornando uma preocupação para o meio ambiente e para a vida humana.

“O lodo de curtume é um resíduo constituído de materiais orgânicos de origem animal misturados com sais inorgânicos.” (MARTINELLI *et al*, 2019). De acordo com Kohara *et. al.* (2017) esse resíduo é gerado em grande escala no processo de curtimento, tendo alto índice de cromo, por esse motivo é considerado uma ameaça para o meio ambiente, e estudos mostram que este lodo infecta o ar, água e solo.

“O lodo de curtume, resíduo da indústria do couro, é gerado a partir da decantação dos banhos residuais do processamento do couro e é contaminado com metais pesados, o que impede sua disposição no meio ambiente sem tratamento prévio”. (MUNIZ *et al*, 2018, p.93).

Os metais são considerados pesados quando tem massa específica maior que 5 g/cm³, atividades laboratoriais e indústrias realizadas geram esse tipo de metal que causam sérios danos ao meio ambiente, por isso estes devem ser tratados; alguns dos metais pesados são necessários para o corpo humano, mas em baixas concentrações, a partir do momento que as concentrações dos metais pesados aumentam podem causar malefícios para a saúde (CAVALCANTE, 2021). A tabela 1, apresenta a quantidade de alguns elementos químicos presente no lodo de curtume de acordo com Mala faia *et al.* (2015). Nota-se uma alta concentração para o metal pesado cromo.

Tabela 1 – Caracterização química do Lodo de Curtume

Variáveis	Lodo de Curtume
N	8,52
P	10,99
K	72
Na	13,38
Ca	80,86
Mg	4,0
Cu	1,1
Fe	4,83
Mn	0,01
Cr	12,01
Zn	0,11

Fonte: adaptada de MALAFAIA *et al.* (2015)

Segundo Malafaia *et al.* (2016), na produção do couro são utilizados diversos produtos químicos, e estes, são considerados altamente tóxicos. Por isso, o subproduto gerado sua produção, o lodo de curtume, não pode ser utilizado diretamente em outros processos, sem ao menos um tratamento, mesmo possuindo características e elementos essenciais para crescimento de plantas, por exemplo, além disso, é necessário também estudar a combinação do lodo de curtume com a água de irrigação.

Berilli *et al.* (2018) afirma que o lodo do curtume tem um ótimo potencial para ser utilizado em fertilização por serem rico em nutrientes essenciais para os vegetais, muitos utilizam esse resíduo na sua forma sólida, porém essa não é sua única maneira de utilização, isso por que, no estado o líquido o lodo de curtume também traz bastantes benefícios, como por exemplo a adubação. Existem estudos que mostram que ele é realmente eficaz no crescimento das plantas, porém, não em todas as espécies, mas é necessário um estudo muito bem realizado para que não ocorra a contaminação das plantações.

Tendo em vista o processo incluído como etapa na produção do couro, tem-se na Tabela 2 a quantidade de insumo utilizado em dois curtumes no Mato grosso do Sul, no ano de 2004/2005.

Tabela 2 – Quantidades de insumos utilizados no curtimento de peles em dois curtumes, no Mato Grosso do Sul nos anos de 2004 e 2005.

Insumo	Unidade	Curtume A	Curtume B
Água	Litros/pele	276	180
Sulfato de cromo III	%	5,5	5,9
Ácido sulfúrico	%	0,3	0,3
Cal hidratada	%	3,5	3,5
Cloreto de sódio	%	6	1,8
Sulfato de amônia	%	3,5	4
Sulfato de sódio	%	1,4	0

Fonte: FREITAS (2006)

A Tabela 3 demonstra as concentrações de cromo nos efluentes brutos de dois curtumes no Mato Grosso do Sul, no ano de 2004/2005.

Tabela 3 – Concentrações de cromo nos efluentes brutos de dois curtumes, no Mato Grosso do Sul nos anos de 2004 e 2005.

PERÍODO DE COLETA	CURTUME A			CURTUME B		
	Cr VI (mg/L)	Cr III (mg/l)	Cr Total (mg/L)	Cr VI (mg/L)	Cr III (mg/l)	Cr Total (mg/L)
Setembro	ND	558,43	558,43	ND	38,18	38,18
Novembro	ND	226,44	226,44	ND	201,31	201,31
Dezembro	ND	104,31	104,31	-	-	-
Janeiro	ND	351,22	351,22	ND	279,84	279,84
Fevereiro	ND	152,81	152,81	ND	248,75	248,75
Março	ND	868,8	868,8	ND	322,17	322,17
Abril	ND	774,8	774,8	ND	138,2	138,2
Estatística		Curtum e A			Curtum e B	
Mínimo		104,31			38,18	
Máximo		868,8			322,17	
Mediana		351,22			225,03	
Média aritmética		433,83			204,74	
Soma dos postos (1)		58			33	
p (Kruskal-Wallis)		0,1958				

Fonte: FREITAS (2006)

Na tabela 3 é possível perceber que tanto no curtume A, como no curtume B não existe a presença do cromo tetravalente, ou seja, estudo realizado por Freitas (2006) faz uma comparação entre dois curtumes, o curtume A, o qual o cromo é utilizando novamente e o curtume B, onde não existe reciclo, isso justifica porque na maioria dos meses as concentrações do curtume A são maiores.

3.2. ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO

Segundo Silva *et al.* (2021) a Estabilização por Solidificação (E/S) é um processo possível para o tratamento dos resíduos sólidos, sendo interessante em etapas que existem elementos tóxicos, permitindo que o resíduos se estabilizem, diminuindo assim, o impacto ao meio ambiental e aos seres vivos. A E/S é viável pelo fato dela paralisar a alta toxicidade que um determinado metal causa sendo descartado em altas concentrações no meio ambiente. O procedimento da E/S é realizado através da

imobilizaçãodo metal em uma matriz, chamada de aglomerante, podendo ser de cimento, argila, asfalto, cal, entre outros.Uma alternativa de destinação correta de resíduos industriais é a solidificação de resíduos utilizando cimento (SIMÕES; BRAGA; BRITO, 2019). O cimento é o mais utilizado por possuir reação química ativada apenas com a água.

Para Zhao *et al.* (2021), o cimento tem sido bastante utilizado por ele conter alguns produtos químicos que fazem com que os metais pesados sejam imobilizados fisicamente, e isso acontece quando o cimento tem contato com a água. Mesmo sendo muito indicado, na utilização do cimento são destacados dois entraves: o primeiro é a perda da força mecânica e a segunda, seria em relação ao produto final ter contato com a água e acabar tendo uma diluição dos metais pesados.

Porém, por ser uma técnica de nível fácil e de valor mediano, a estabilização por meio do cimento é uma possibilidade muito indicada para conter a disseminação dos metais pesados ou diminuir os danos ao meio ambiente. No processo a E/S prende o contaminante evitando a lixiviação dos metais pesados para o ambiente.

De acordo com Rojas *et al.* (2017), a técnica de E/S vem cada dia sendo mais utilizada por ser de baixo custo, em comparação aos outros métodos, e por possuir eficiência no resultado, diminuído consideravelmente seu nível tóxico, o tratamento de estabilização por solidificação é considerado pelo autor como um processo de segurança e eficácia, assim sendo cada vez mais adquirida pelas indústrias.

O tratamento de estabilização por solidificação é realizado através do aprisionando o material contaminado, na maioria das vezes, em cimento, fazendo com que o metal pesado fique imóvel e tornando-se quimicamente menos perigoso e aceitável para o meio ambiente; o cimento é utilizado na maioria das vezes por ter um bom nível de eficácia (SOUIDI, 2020).

Para Li *et al.* (2019), a E/S é um método que utiliza as propriedades químicas e físicas do material fazendo com que o produto final tenha um alto índice de lixiviação ou seja, o que antes tinha um alto teor de metal pesado, após passar pelo processo de E/S, esses valores são diminuídos positivamente e consideravelmente.

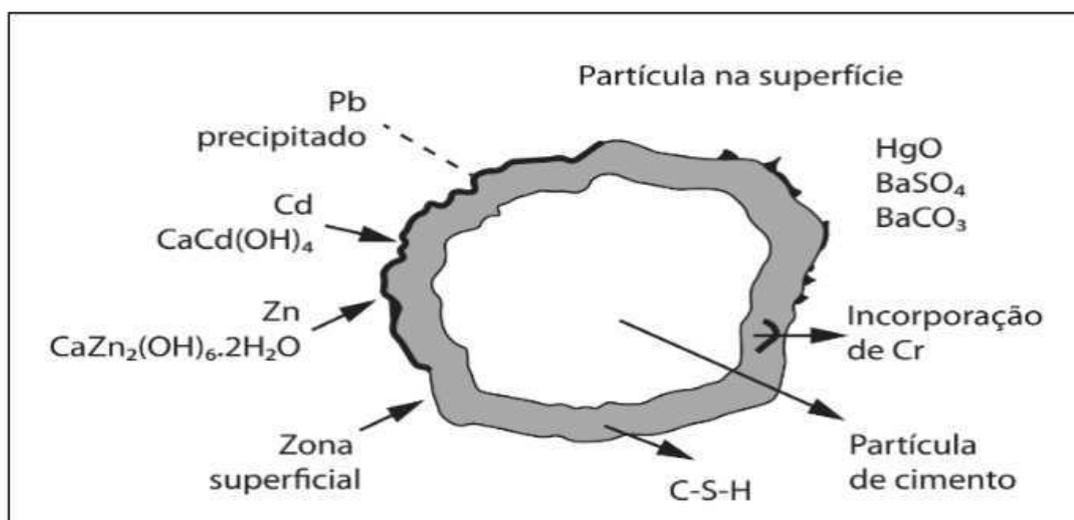
De acordo com Chen *et al.* (2009), quando a E/S utiliza o cimento a granulometria do mesmo interfere devido a sua característica de ser mais fino na hora da

hidratação, ou seja, quanto mais superfícies tiverem, maior será a quantidade depois da hidratação, porém de toda forma a granulometria do cimento não é levada tanto em consideração quanto a composição química do cimento, pois este último é mais importante para uma boa resistência.

Para Conner (1990), a E/S é o aprisionamento do metal pesado em uma matriz, onde ocorrem reações químicas entre o contaminante e o cimento, assim fazendo com que o metal fique preso e não chegue até o meio ambiente. O referido autor também defende o uso do cimento Portland, pois seu pH faz com que os cátions sejam transformados em hidróxido, óxido e carbonatos insolúveis.

A figura 2 representa o esquema de como ocorre a E/S na matriz de cimento Portland.

Figura 2 – Esquema de estabilização por solidificação em matriz de cimento Portland



Fonte: Conner (1990)

A Figura 2 representa bem o que ocorre entre os metais pesados e o cimento, o cromo é incorporado no interior do silicato de cálcio hidratado, o chumbo, cádmio e zinco são incorporados na superfície do composto hidratado, o óxido de mercúrio e os sais de bário, não são incorporados devido alto pH, que os transformam em óxido e carbonatos insolúveis.

3.3.USO DE CIMENTO PARA A ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO

O cimento mais utilizado na E/S, é o Portland, por ser de fácil comercialização, baixo custo e simples manuseio; e muitas das vezes ele é utilizado sozinho por formar o

gel C-S-H que é responsável pela resistência mecânica e tem um papel importante na E/S devido seu endurecimento (SPENCE, 2004).

O cimento Portland é hidráulico, ou seja, ele reage quando misturado a água, acontecendo desta forma: no cimento é adicionada água formando um gel, ocorrendo à liberação de calor que formam agulhas de cristais que se aglomeram até o cimento endurecer completamente. O cimento Portland é resistente a vários agentes agressivos, como à: água salgada, ácida e água proveniente de indústrias que são ricas em metais pesados.

Segundo Spence (2004) o tratamento de E/S é considerado eficiente quando ele neutraliza a acidez, destrói os complexos metálicos, consegue controlar a oxidação, converte o resíduo sólido em insolúvel e transforma-se em sólido.

Na maioria dos casos os metais pesados são estabilizados apenas com o controle da acidez, transformação para insolúvel e formação do material sólido, essas são características do cimento Portland.

A desvantagem do cimento Portland está em relação ao seu pH ,o qual afeta diretamente a lixiviação e solubilidade. Em alguns metais pesados como os metais anfóteros é necessário um pH de 10 para que eles sejam precipitados, porém o pH do Portland não necessita chegar a esse valor para ocorrer a precipitação causando um efeito bastante significativo no resultado da lixiviação.

Para Paixão (2019) a E/S pode ser vista como um pré-tratamento de resíduo sólido como também o próprio tratamento do resíduo; este tratamento é composto por dois mecanismos, o físico que é a solidificação onde o resíduo sólido é encapsulado, e o químico que estabiliza os metais pesados presentes, a autora destaca também o cimento Portland como uma alternativa eficiente para tratamentos onde ocorrem reações químicas dos íons metálicos com aglomerantes, afirmando como os demais autores anteriormente citados, que os metais pesados ficam presos no material, facilitando o seu descarte ou utilização sem que haja contaminação do meio ambiente ou para a saúde da população.

O cimento Portland é composto pelo clíquer (argila e calcário que são ricos em alumínio, silício, cálcio e magnésio) e adições. Uma das adições que compõe o cimento é a gipsita, que é um tipo de gesso, a mesma, portanto tem o papel de controlar o tempo de “pega” do cimento, ou seja, quando o cimento entra em contato com a água, isso

porque sem a presença da gipsita, caso a água entre em contato com o cimento a massa logo endureceria.

Os principais óxidos presentes no clínquer são: óxido de cal (CaO), óxido de silício (CSi₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), esses óxidos são combinados entre si e forma os silicato tricálcico (Ca₃SiO₅), silicato dicálcico (Ca₂SiO₄), aluminato de cálcio (Ca₃Al₂O₆) e ferrita (Ca₄Al₂Fe₂O₁₀), mas também tem a presença de outros óxidos que ficam responsáveis pelo atraso do tempo de pega, que são: óxido de magnésio (MgO), óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O) e o óxido sulfúrico (SO₃) (SENFF, FOLGUERAS e HOTZA; 2005).

O processo de hidratação do cimento é definido pelas reações químicas que ocorrem entre a água, os silicatos e os aluminatos presentes no cimento, sendo reações exotérmicas.

No cimento tem a presença do clínquer, que é constituído por alita (3CaO.SiO₂), belita (2CaO.SiO₂), aluminato tricálcio (3CaO.Al₂O₃) e ferro aluminato tetracálcico (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃), assim quando o cimento é hidratado é formado a portlandita (Ca(OH)₂) e o silicato de cálcio hidratado (3CaO.2SiO₂.3H₂O):

Reação de hidratação da alita:



Reação de hidratação da belita:



As duas reações de hidratação produzem tanto silicato de cálcio hidratado, como portlandita em quantidades diferentes. Por isso, é necessário a adição do sulfato de cálcio (3CaSO₄.2H₂O), devido este ser um agente regulador que serve para controlar o endurecimento do cimento (PAIXÃO, 2019).

De acordo com Brito (2007) a reações de hidratação são responsáveis pela resistência de um material estabilizado por solidificação, isso ocorre quando é adicionado água ao cimento, pois quando a água entra em contato com o aluminato tricálcico ocorre o endurecimento.

3.4. ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO DE LODO DE INDÚSTRIA DE CURTUMES

De acordo com Muniz *et al* (2018) a E/S é uma tecnologia que paralisa o poder tóxico presente no lodo de curtume. As indústrias de curtume comumente descartam ao meio ambiente esse resíduo sem nenhum tipo de tratamento, o qual se torna perigoso e nocivo por conter metais pesados, como por exemplo, o cromo, que é utilizado para evitar que o couro apodreça.

Por passar pela decantação, o lodo, como dito anteriormente, tem um alto poder tóxico, maior que o líquido do processamento, isso porque, o cromo presente nesse resíduo possui uma alta facilidade de contaminação, podendo atingir os lençóis freáticos, reservatórios de água, rios, solos e conseqüentemente as plantações, refletindo desse modo em doenças respiratórias e de pele, caso contato com seres humanos, além da própria degradação do meio ambiente. Por isso, é necessária a busca de tecnologias para minimizar ou solucionar esses danos, como por exemplo, o tratamento realizado por E/S, que por sua vez tem o objetivo de paralisar o metal pesado evitando que ele dissemine e cause todos os problemas citados, a E/S nada mais é que a estabilização do metal pesado em algo sólido, por isso muitas vezes é utilizado o cimento.

Antes da escolha do método de tratamento do lodo de curtume, é importante também analisar formas de benefícios que ele pode trazer, ou seja, ele pode ser utilizado como fertilizante, aterro, construção de estrada e tijolo, devendo este ser realmente eficaz porque os metais podem ser absorvidos pelas plantas, afetando os animais e humanos, ou em aterros dependendo da disponibilidade de terras e nas construções, facilitando a lixiviação dos metais (JUEL, 2021).

Segundo Simões, Braga e Brito (2019), um ponto característico dos efluentes de curtume é a existência do cromo, e infelizmente é na sua forma tóxica, resíduos que contém cromo são classificados como classe I – perigosos. Na produção do couro é obtido cinco vezes mais o valor em lodo, esse lodo precisa de tratamento sendo a E/S uma ótima intervenção por conseguir converter o lodo de curtume de classe I perigoso em classe IIB.

De acordo com Hasan (2022), são produzidos em todo o mundo 6.960,3 mil toneladas de couro, gerando 6 milhões de toneladas de resíduos sólidos e 120 milhões

de toneladas de resíduos líquidos; para melhor entendimento a cada 1kg de couro produzido é gerado 50kg de água residual e de 150 à 250 kg de lodo de curtume.

A indústria de curtume utiliza muita matéria tóxica que causa poluição, segundo Santos e Araújo (2020), por motivos de grande aumento dos impactos ambientais negativos, existe a necessidade da intervenção desses malefícios para o meio ambiente, e cada vez mais se procura a melhoria na produção ou o tratamento desses resíduos. Essas intervenções são feitas a partir de leis e regras normativas.

A indústria de couro utiliza muita água, energia elétrica e produtos químicos, assim, tendo também a geração de muito rejeito sendo esses o lodo e demais efluentes líquidos, onde o primeiro é o que tem maior concentração de material tóxico.

A indústria de couro é uma indústria que passa por diversos processos, até porque o couro advém de pele de animal, sendo assim, considerado um dos mais que poluem; as poluições do processamento do couro podem estar presentes no ar, água, solo e resíduos, e causam como impactos ambientais: odor, prejuízo à qualidade da água e prejuízo ao solo.

BASEGIO *et al.* (2002), também afirma em seus estudos que no processo de produção do couro é utilizado bastante água e produtos químicos, o que ao final é transformado em águas residuais; o autor também diz que os sais de cromo são os mais utilizados para a etapa de curtimento, por terem ótima resistência mecânica, boa ação de tingimento do couro e a melhor resistência hidrotérmica. O problema dos sais de cromo é que os mesmos não reagem totalmente no processo, ficando uma parte no chamado “lodo”. Há casos que o lodo pode passar pelo processamento de hidrometalurgia, que é um método para recuperar o metal nesse caso seria o cromo, ou passar pelo processamento de diminuição do metal, para que o efluente seja descartado sem perigo para o meio ambiente.

Para Furman (2017), a indústria de couro da mesma forma que cresce cada vez mais e tem grande lucro econômico, também tem grande aumento nos resíduos tóxicos, acarretando diversos problemas como a degradação ambiental. Assim como Schoeler (2019) que corrobora com esse pensamento, pois afirma que as indústrias de couro são classificadas como indústrias que causam impactos ambientais por serem responsáveis por uma grande escala de produção, que conseqüentemente gera resíduos altamente

tóxicos, geralmente essas fábricas têm as estações de tratamentos, visando seguir a legislação, sem contar que com o tratamento em seguida pode ser usado o material para construções, dependendo da resistência à compressão.

Sobre resistência à compressão, de acordo com Simões, Braga e Brito (2019), o material ele deve ter uma resistência maior que 1MPa para que possa ser utilizado na construção civil, produção de tijolos ou serem colocados em aterros de resíduos perigosos. Na pesquisa de Simões, Braga e Brito (2019), eles obtiveram o resultado de 7,24 e 16,24 MPa para corpo de prova com resíduo de lodo de curtume e para corpo de prova sem resíduo, respectivamente; valores esse obtidos utilizando o cimento Portland.

Já na análise da capacidade de absorção de água, eles obtiveram valores de 5,4% sem resíduo e 12% com resíduo, onde o valor máximo permitido é de 40%, porém, sendo justificado que quando o corpo de prova tem o resíduo existe uma maior porosidade, assim tendo a maior porcentagem do que o sem resíduo. Os resultados obtidos para umidificação e secagem, que são extremamente importantes para identificação da estabilidade ao longo do tempo, foram: 5,91% com resíduo e de 7,36% sem resíduo, sendo o valor máximo de 15%.

Na pesquisa de Paixão (2019) foram obtidos valores entre 2,01 e 4,21 MPa, para a RC ser aprovada ela precisa ser maior que 1 MPa, assim podendo ser utilizado na construção civil; a autora constatou que quando teve aumento da porcentagem do resíduo sólido de laboratório, existiu também a diminuição da resistência a compressão, isso é explicado pela interação do cromo com o cimento que retarda a reação de hidratação. No estudo da unidade/secagem, não se deve perder mais de 15% da massa inicial, as perdas foram menores que 15% de massa, assim também foram aprovados no quesito Umidade/Secagem foi constatado que a porcentagem do RS não influenciou no resultado.

Segundo Cavalcante (2021) no seu estudo com resíduo sólido de laboratório para U/S, com a concentração de 45%, não foi possível a conclusão, porém, nas outras porcentagens ele conseguiu valores de perda de massa inferiores a 15%, que são consideradas aprovadas. O autor também constatou que quanto menor a temperatura, maior a U/S; e na análise de resistência à compressão apenas o experimento com 10% do resíduo e a temperatura de 6°C obteve valor maior que 1 MPa, que foi justificado

com a análise de CAA, pois o experimento que teve menor absorção de água foi o que teve maior RC.

As matrizes de cimento que estão com lodo de curtume absorvem mais água do que as matrizes que não tem resíduo, isto acontece porque quanto mais resíduos, mais espaço poroso vai ter na matriz e assim conseqüentemente vai absorver mais água (SIMÕES; BRAGA; BRITO,2019). Guimarães (2017), que também utilizou o resíduo sólido do lodo de curtume, também observou que quando a porcentagem do lodo de curtume aumentava, havia um aumento na CAA, tendo melhor resultado no menor tempo de cura, mas todos os ensaios foram aprovados com porcentagem de massa menor que 40%.

GUIMARÃES (2017) constatou que quando aumentava a porcentagem do lodo de curtume, aumentava também a porcentagem de umidificação e secagem, sem interferência do tempo de cura. Brito (2007) relata que quanto menos massa das matrizes cimentíceas for perdida mais satisfatória será a estabilização do material. SIMÕES, BRAGA e BRITO (2019) dizem que a análise de umidificação e secagem são de extrema importância porque ela testa a estabilidade ao longo do tempo das matrizes de cimento, assim as matrizes não podem perder valores superiores a 15% do seu peso inicial.

A Demanda Química de Oxigênio é referente à quantidade de matéria orgânica presente, o lodo de curtume apresenta altas concentrações por conta da sua constituição química tanto das peles e couros dos animais, como da quantidade de produto químico que é utilizado na produção do couro (GUIMARÃES, 2017). Se a DQO estiver presente em altas concentrações no extrato lixiviado do cimento, isso pode ser justificado pela quantidade de areia que foi adicionada na produção dos corpos de prova (SIMÕES; BRAGA; BRITO,2019).

Ueda *et al.* (2017) compararam dois coagulantes para observar e obter a eficiência da lixiviação do cromo e do alumínio, eles constataram que quanto mais se utiliza o lodo de curtume e o coagulante de sulfato de alumínio, maior a lixiviação do cromo. As tabelas 4 e 5 mostram a lixiviação do cromo e alumínio, utilizando o coagulante de sulfato de alumínio e do coagulante PG α 21Ca, respectivamente.

Tabela 4 - Concentração de metais nos lixiviados das matrizes de argamassa contendo lodo seco do tratamento de efluente de curtume com o coagulante sulfato de alumínio

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

Fonte: Ueda *et al.* (2017)

Tabela 5 - Concentração de metais nos lixiviados das matrizes de argamassa contendo lodo seco do tratamento de efluente de curtume com o coagulante PG α 21Ca.

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

Fonte: Ueda *et al.* (2017)

Na tabela 6 é mostrado que a partir de estudos sobre a lixiviação do cromo, Ueda *et al.* (2017) chegaram à conclusão das melhores proporções para a produção da argamassa.

Tabela 6 – Proporções de materiais no preparo da argamassa.

Proporção de lodo seco (%)	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)	Lodo seco (g)
0,0	300	600	150	0,0
0,5	300	600	150	1,5
1,0	300	600	150	3,0
2,0	300	600	150	6,0

Fonte: Ueda *et al.*(2017)

A Tabela 7 mostra os componentes da matriz cimentícia dos corpos de prova.

Tabela 7 - Composição da Matriz Cimentícia dos Corpos de Prova

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

Fonte: Silva (2018)

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

A Tabela 7 é resultado do estudo de Silva (2018) que também mostra como ficou a composição da sua matriz cimentícia, além do que Ueda (2017) e Silva (2018) também utilizaram brita.

Silva (2018) garante que, de acordo com a sua pesquisa com o RSL, o tratamento de estabilização por solidificação é eficiente, pois a mesma obteve uma lixiviação do cromo de em média 97,63%, afirmando assim, que quanto mais for inserido resíduo na matriz de maior porcentagem, maior será a lixiviação. Em seu estudo Silva (2018) constatou que os corpos de prova são realmente resistentes a compressão com valores maiores que 1MPa, e podendo até serem usados na área da construção civil, ela também obteve valores de perda de massa inferiores a 15% no ensaio de umidificação e secagem, estando dentro do indicado. Na análise de capacidade de absorção de água, a autora concluiu que o resíduo sólido que utilizou influência, no caso, quanto maior a porcentagem de resíduo, maior a absorção de água. E por último também foram obtidos ótimos valores para o extrato solubilizado, onde os valores foram superiores aos limites máximos permitidos, como indica a ABNT NBR 10004/2004.

A ABNT NBR 10004/2004 tem estabelecido valores máximos da concentração do cromo total permitido tanto na lixiviação, 5,0 mg/L, quanto para solubilização, 0,05 mg/L; caso após as análises de lixiviação ou de solubilização os valores forem maiores dos que o permitido é considerado resíduo perigoso, e é necessário que seja feito o tratamento de estabilização antes do descarte ao meio ambiente para evitar contaminação.

No lodo de curtume estão presentes os metais, como: Cr, Ni, Zn, Co, Cu, Fe, As, Mn e Pb (JUEL, 2021). Sendo o cromo um elemento tóxico e essa sua característica

vem da sua forma química e de como ela é exposta, ele possui várias formas de oxidação, uma delas é o Cr (III) que é essencial para o ser vivo e o Cr (IV) que é tóxico, mas não é porque o ser humano necessita do Cr (III) que ele não faz mal para saúde, tudo é questão da concentração que se ele estiver em alto nível de concentração ele se torna tóxico (SILVA, 2018).

4. METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos (LABGER) pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ) situada no Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) na cidade de Campina Grande, Paraíba, Brasil.

4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente, foi adotado o planejamento fatorial b^k com adição de três repetições no ponto central (PtCt), onde o ponto central é a média aritmética dos níveis nos fatores, k representa o número de fatores e b representa o número de níveis.

O planejamento fatorial com adição de PtCt será usado para testar a linearidade do modelo.

A adição do ponto central (PtCt) permitirá avaliar a variância do erro experimental quando experimentos não replicados nos pontos fatoriais forem realizados.

Os fatores adotados foram: Percentagem de lodo e o tempo de cura. Para o fator de porcentagem da massa do resíduo sólido (Curtume) em relação à massa do cimento, foram usados os níveis 10% e 30% de resíduo sólido (Curtume) em matriz cimentícia, codificados com (-1) e (+1), para níveis baixos e altos, respectivamente. Para o fator tempo de cura, foram usados os níveis 7 e 28 dias, codificados nos níveis baixo (-1) e alto (+1), respectivamente.

Na Tabela 8, é apresentada os níveis dos fatores e os pontos centrais com códigos: (0).

Tabela 8 - Níveis dos fatores do processo de estabilização por solidificação

Fatores	Nível baixo (-)	Ponto Central (0)	Nível Alto (+)
Percentagem (%)	10%	20%	30%
Tempo de Cura (dias)	7,0 dias	17,5 dias	28,0 dias

Fonte: Dados da pesquisa, 2023.

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

$$n = 2^k + m \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

- 2^k : Número de pontos fatoriais
- m : Número de replicações do ponto central

Como o planejamento foi composto por 2 fatores (percentagem e tempo de cura) e 3 pontos centrais, foram realizados 7 experimentos sem repetições, exceto no PtCt. Na Tabela 9 é apresentada a matriz de planejamento:

Tabela 9 - Matriz de planejamento fatorial com adição de três pontos centrais

Experimento	Nível do Fator 1 (Percentagem)	Nível do Fator 2 (Tempo de Cura)	Fator 1 - Real (Percentagem)	Fator 2 - Real (Tempo de Cura)	Variável Resposta (VR)
Exp ₁	-1	-1	10%	7,0 dias	y ₁
Exp ₂	+1	-1	30%	7,0 dias	y ₂
Exp ₃	-1	+1	10%	28,0 dias	y ₃
Exp ₄	+1	+1	30%	28,0 dias	y ₄
Exp ₅	0	0	20%	17,5 dias	y ₅
Exp ₆	0	0	20%	17,5 dias	y ₆
Exp ₇	0	0	20%	17,5 dias	y ₇

LEGENDA - VR: Variável resposta; y: Resposta do experimento.

Fonte: Elaborada pela Autora, 2023.

4.2 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para avaliação dos materiais estabilizados por solidificação foram confeccionados corpos de prova seguindo as etapas apresentadas abaixo:

- (i) Inicialmente definiu-se o traço de 1:5 (quantidade de cada componente que obedece a uma determinada proporção, variando de acordo com a finalidade do uso e com as condições de aplicação) para corpos de provas com 450 g e pesaram-se os aglomerantes (Cimento Portland e areia) separadamente em uma balança analítica com precisão de 0,01 g;
- (ii) Pesou-se o resíduo sólido (Curtume) de acordo com as percentagens pré-determinadas em relação à massa do cimento em uma balança analítica com precisão de 0,01 g;
- (iii) Foram adicionados os aglomerantes e o resíduo (Curtume) em uma cuba metálica e misturou-se manualmente, de forma a obter uma massa homogênea;
- (iv) Registrou-se a hora em que os aglomerantes foram postos em contato com a água de mistura, iniciando-se a contagem do tempo de preparação dos corpos de provas, em média, 24 horas;
- (v) Foram adicionadas na parte superior do molde placas de vidro retangulares medindo: 70 mm x 100 mm visando homogeneizar os corpos de prova;
- (vi) Deixou-se em repouso por um período de 24 horas para endurecimento da pasta.

A Figura 3 mostra os materiais que foram usados, a moldagem do corpo de prova e os corpos de prova após 24h da moldagem.

Figura 3 – Materiais e corpos de prova confeccionados para a pesquisa



Fonte: Dados da pesquisa, 2023.

4.3 ENSAIO DE INTEGRIDADE/DURABILIDADE E IMOBILIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES

Para avaliar os materiais Estabilizados por Solidificação nesse trabalho, será 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, 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: resistência à compressão (RC), capacidade de absorção de água (CAA) e umidificação e secagem (U/S). E para avaliar a imobilização dos contaminantes foi realizado o ensaio de lixiviação. Além disso, também foram realizadas outras análises físicoquímicas como Umidade, Sólidos Totais, Fixos e voláteis, pH e DQO.

4.3.1 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 2.

$$RC = \frac{F}{A} \quad \text{Eq.(2)}$$

Em que:

RC: Resistência a compressão em MPa

F: Força de ruptura dos corpos de prova em kgf

Área: Área de seção dos corpos de provas em cm²

A Figura 4 mostra o equipamento para realização do procedimento de resistência a compressão.

Figura 4 – Equipamento de resistência à compressão.



Fonte: Dados da pesquisa (2023).

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.

4.3.2 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 5 ilustra os corpos de prova durante o teste de capacidade de absorção de água.

Figura 5 – Ensaio de Capacidade de absorção de água.



Fonte: Dados da pesquisa (2023).

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°C numa faixa de 60°C a 100°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 3 conhecendo-se a massa do corpo de prova após saturação em água e a massa do corpo de prova seco.

$$CAA(\%) = \frac{Msat - Ms}{Ms} \times 100 \quad \text{Eq.(3)}$$

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.

4.3.3 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 é colocado em um recipiente e umidificado com água a 22 ± 3 °C. Em seguida, é realizada a secagem com auxílio de estufa a 105 ± 5 °C, visando avaliar a durabilidade em 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 é realizado o cálculo da Equação 4 para observar o percentual que foi degradado ao longo do teste.

$$PP(\%) = \frac{Pnat - P_{ciclo\ i}}{Pnat} \times 100 \quad \text{Eq.(4)}$$

Em que:

PP: Perda de Peso

Pnat: Peso da amostra natural

Pciclo i: Peso da amostra após cada ciclo de umidificação/secagem

A seguir tem-se a Figura 6 ilustrando o procedimento realizado conforme descrito anteriormente.

Figura 6 – Realização do ensaio de Umidificação/Secagem.



(A)

(B)

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

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

4.3.4 Análises ambientais e físico químicas

Assim como nos aglomerantes, também foram realizadas as análises físicas e químicas para caracterizar as matrizes cimentícias, 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), pH e DQO (APHA, 2005).

4.3.4.1. Ensaio de DQO

A avaliação da DQO foi realizada com o objetivo de determinar o teor de matéria orgânica presentes nos corpos de provas confeccionados. O ensaio da DQO é realizado, a partir do extrato lixiviado, de acordo com as etapas a seguir:

- Diluir a amostra do extrato lixiviado 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°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.

Após a amostra ser digerida por duas horas, foi transferido o conteúdo para um erlenmeyer, e então completada com água destilada para um volume de 25 mL e em seguida adicionada uma gota de ferroína na amostra, em seguida foi realizada a titulação com a solução de sulfato ferroso amoniacal.

O valor da concentração da Demanda Química de Oxigênio será obtida a partir da equação (5):

$$DQO \left(mg \frac{O_2}{l} \right) = \frac{(VPB - VPA) \times 1000}{VP} \quad \text{Eq.(5)}$$

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.

4.3.4.2. Ensaio de 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).

Na presente pesquisa, foram submetidas ao ensaio de lixiviação as matrizes cimentícias confeccionadas anteriormente para obter o extrato lixiviado, no qual foi realizada a análise de determinação de metais. Os resultados obtidos serão comparados com os limites estabelecidos pela Norma da ABNT NBR 10.004 (2004): Concentração – Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação e pela NT – 202 R.10 – Norma técnica FEEMA: Padrões de lançamento de efluentes líquidos e na resolução CONAMA Nº 430/2011, a qual classifica o extrato lixiviado dos resíduos como classe I – perigosos ou classe II – não perigosos.

Para realizar o ensaio de lixiviação, inicialmente, foram pesadas 100g de cada amostra (base seca), as quais foram colocadas individualmente em um frasco com capacidade > 2000 mL com a solução lixiviante (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, sendo a relação líquido-sólido (L/S) de 20:1, permanecendo em agitação por um período de 18 ± 2 horas, ABNT NBR 10.005 (ABNT NBR 10.005, 2004).

Em seguida foi realizada a filtragem do extrato, o armazenamento e encaminhou-se para análise de Espectrofotometria de Absorção Atômica (AAS), para determinação de metal pesado cromo. Por se tratar de um resíduo sólido é mais apropriado expressar os resultados em mg. kg^{-1} , conforme a Equação 6.

$$C1 = C2 \cdot \frac{V}{M} \quad \text{Eq.(6)}$$

C1: concentração (mg.kg^{-1})

C2: concentração (mg.L^{-1})

V: volume do lixiviado (L)

M: massa da amostra (kg)

Foi realizada a análise de Espectrofotometria de Absorção Atômica (AAS) que é uma técnica utilizada para determinar a concentração de metal pesado cromo nos extratos lixiviados.

4.4 DETERMINAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA DOS CONTAMINATES

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 (LEITE; 1997; BRITO, 1999). O balanço de massa foi calculado pela Equação 7.

$$M = M_1 - M_2 \quad \text{Eq. (7)}$$

Em que:

M: Massa do contaminante retida na matriz de cimento;

M_1 : Massa do contaminante presente na RSLC antes do tratamento em g;

M_2 : Massa do contaminante presente no Material E/S após o tratamento em g.

4.5 EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DOS CONTAMINANTES

A retenção dos contaminantes foi calculada em função das massas e concentrações dos resíduos e aglomerantes conforme a Equação 8. O objetivo é avaliar e comparar se as massas dos agentes influenciaram na eficiência de retenção dos contaminantes (BRITO, 2007):

$$[X]_{\text{Eficiência Retenção(\%)}} = \left[1 - \left(1 + \frac{RS}{Aglom} \right) \cdot \frac{[y_{Tratado}]}{[z_{Bruto}]} \right] \times 100 \quad \text{Eq. (8)}$$

Em que:

X : Eficiência de retenção (%)

RS: Massa do RSLC (kg)

Aglom. : Massa do aglomerante (kg)

[y_{Tratado}]: Concentração do extrato lixiviado do material tratado (mg.kg⁻¹)

[z_{Bruto}]: Concentração do extrato lixiviado do resíduo bruto (mg.kg⁻¹)

Observação:

A concentração do extrato lixiviado em mg.kg⁻¹ foi obtida após a determinação do contaminante em mg.L⁻¹ 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 9.

$$C_{EL} = C_c \times (m_A / V_{SL}) \quad \text{Eq. (9)}$$

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para verificar a validação do modelo, obter as respostas e verificar se existem efeitos significativos entre as respostas médias dos tratamentos, foi realizada a Análise de Variância (Analysis of Variance – ANOVA) no MINITAB® (2016). A Tabela 10 apresenta a saída do software Minitab para ANOVA (Análise de Variância).

Tabela 10 - Análise de variância (ANOVA)

Fonte de Variação	G.l	Soma Quadrática	Quadrado Médio	Valor de F	Valor de p^1
Regressão	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	R^2_{max}	R			

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 ($p \leq 0,10$); 2 Não significativo ($p > 0,10$); n: Número de observação; R^2 : Coeficiente de determinação; R^2_{max} : Porcentagem máxima da variável explicável; R: Coeficiente de correlação entre as variáveis.

Fonte: Montgomery e Runger, (2003).

A regressão testa se os termos do modelo têm algum efeito na resposta, testa o linear, o quadrático e a interação. Os termos quadráticos 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 na região do ótimo. Nesta pesquisa não foi realizada a otimização. O resultado vai apenas indicar se houve curvatura ou na região. Para futuros trabalho ficará a indicação para aumentar os níveis dos fatores.

O limite do teste usado foi igual a 0,10 ou seja o valor de α . Isso significa que o valor será 10% de probabilidade de erro ou 90% de certeza em cada afirmação sobre os resultados. O motivo foi para obter o melhor ajuste dos modelos.

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 (É a variação devido à inadequação do modelo) e puro erro.

4.6.1 Coeficiente de determinação (R^2)

O coeficiente de determinação foi calculado usando a Equação 10. Ela representa a variação explicável pelo modelo, ou seja, quanto o modelo explica a variação dos dados (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

$$R_{Sq} = R^2 = \frac{SQ_{reg}}{SQ_{total}} \quad \text{Eq.(10)}$$

Em que:

SQ_{reg}: Soma de quadrado da regressão;

SQ total: Somatório de todos os valores observados ao quadrado menos a correção.

4.6.2 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, à Correlação Perfeita
- R > 0,75, à Forte Correlação
- R entre 0,5 e 0,75, à Média Correlação
- R < 0,5, à Fraca Correlação
- R = 0, à Inexistente Correlação

4.6.3 Percentagem máxima de variação explicável

A percentagem máxima de variação explicável foi calculada usando a Equação 11. Ela representa o máximo de variação que o modelo explica. Este valor deve ser comparado com o valor explicado pelo modelo (R^2).

$$R_{\max}^2 = \frac{SQ_{reg} - SQ_{erro\ puro}}{SQ_{total}} \cdot 100 \quad \text{Eq. (11)}$$

Em que:

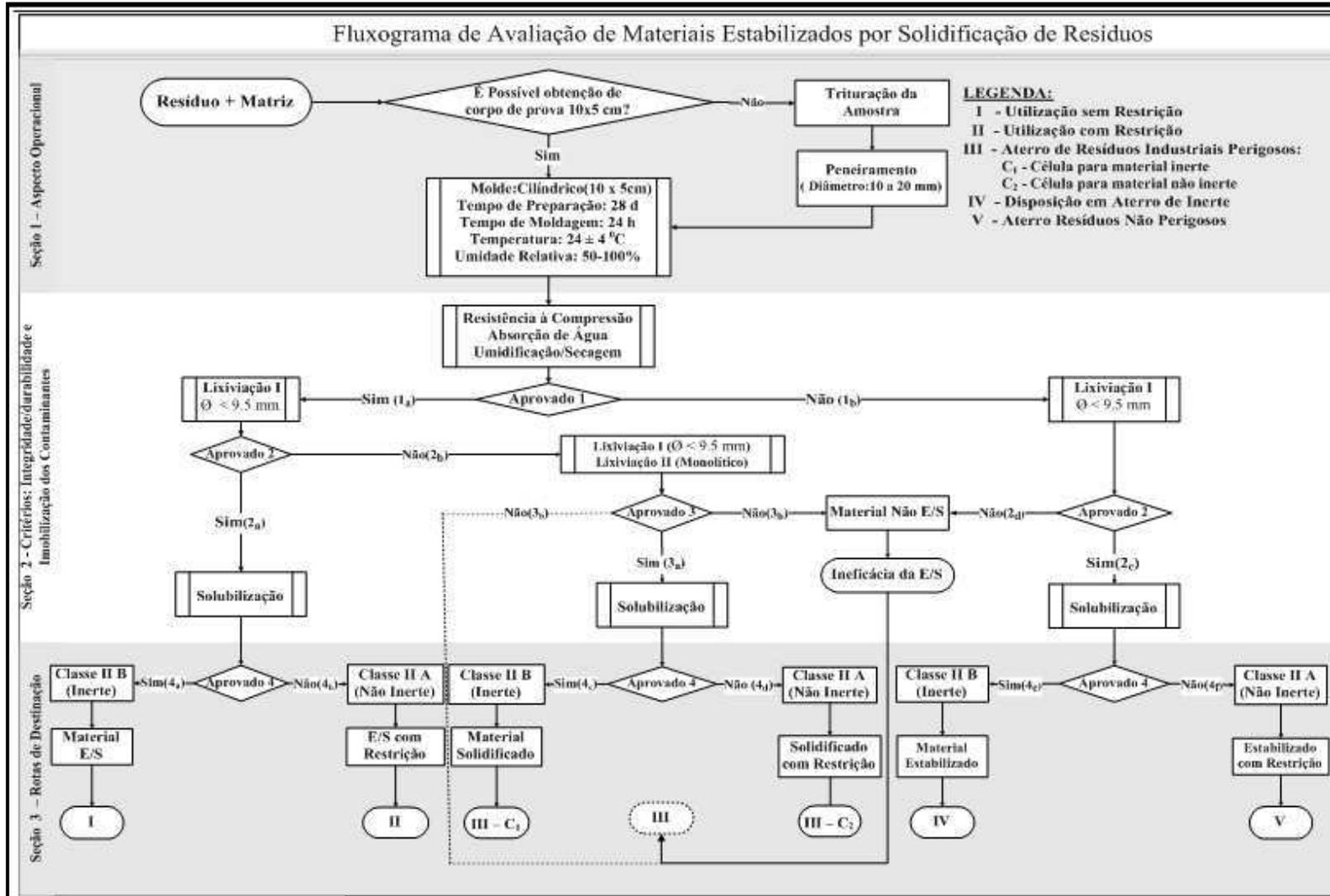
SQ_{puro erro}: Diferença entre a soma do quadrado total menos a soma de quadrado do tratamento.

4.7. ROTAS DE DISPOSIÇÃO

Para avaliar a estabilização por solidificação de resíduos perigosos foi aplicado o Protocolo de avaliação de materiais estabilizados por solidificação. O Protocolo de avaliação de materiais estabilizados por solidificação apresenta os aspectos operacionais, os critérios de avaliação e as rotas de destinação dos materiais.

A Figura 7 mostra o fluxograma de avaliação de materiais proposto por BRITO (2007).

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



Fonte: Brito (2007).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões foram feitos a partir da caracterização e classificação dos materiais. Para o ensaio de integridade, a análise realizada foi a de resistência à compressão (ABNT NBR 7215,1997). E a caracterização foi realizada através da umidade, sólidos totais e suas frações (Standard Methods, 1998), e pH(APHA, 2005).

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO, LODO DE CURTUME E AREIA

Na Tabela 11 estão apresentados os valores obtidos nas análises de Umidade, Sólidos Totais e pH da areia, do Lodo de Curtume e do Cimento Portland Simples tipo CP II-Z 32.

Tabela 11 – Caracterização da Areia, Lodo de Curtume e do Cimento Portland Simples.

PARÂMETRO	ST (%)	STV* (%)	STF* (%)	U* (%)	pH
AREIA	99,92	0,34	99,66	0,08	9,10
LODO DE CURTUME	92,94	18,78	81,22	7,06	8,38
CIMENTO PORTLAND	94,91	12,24	87,76	5,09	12,44

LEGENDA: ST: Sólidos Totais; STF: Sólidos Totais Fixos; STV: Sólidos Totais Voláteis; U:Umidade; *Valor em função dos sólidos totais.

Fonte:Dados da pesquisa, 2023.

De acordo com a tabela 11, a areia que foi utilizada na presente pesquisa apresentou umidade menor que 1% (0,08%) e 99,92% de sólidos totais. Os resultados de sólidos totais e umidade da areia utilizada nesse trabalho ficaram bem próximos aos encontrados por (Guimarães, 2019), o qual apresentou 99,98% de sólidos totais e 0,02% de umidade.

O lodo de curtume apresentou 92,94% de sólidos totais, ou seja, total da massa seca, deste total 81,22% são sólidos totais fixos, que é a matéria inorgânica, e 18,78% são dos sólidos totais voláteis, que representam a matéria orgânica; e em relação a umidade, teve o valor de 7,06%. Isso indica que o lodo de curtume é predominantemente rico em material inorgânico e com baixo teor de material orgânico, esse valor de STF justifica o tratamento usando E/S na presente pesquisa.

Guimarães (2017) afirma que as altas percentagens de sólidos totais presentes no cimento provem do alto teor de matéria seca, já as altas percentagens nos sólidos totais

fixos se justificam pelo teor de compostos orgânicos, e estes podem ser provenientes da adição da areia. Para o tratamento de estabilização por solidificação não é interessante que o resíduo sólido apresente um alto teor de umidade, pois isso significa que tem bastante água, e o excesso da mesma dificulta as reações entre os agentes solidificantes e o resíduo sólido (Silva, 2018), com isso, o teor de umidade encontrado no resíduo sólido de curtume da atual pesquisa tem um valor considerável para atingir uma boa eficiência no processo de estabilização por solidificação.

Ainda analisando a tabela 11, o cimento Portland apresentou 94,91% de sólidos totais que pode ser justificado pelo elevado teor de matéria seca e baixa umidade (5,09%). O cimento desta pesquisa apresentou pH 12,44 que é alcalino, podendo ser justificado pela presença de portlandita. Guimarães (2017) obteve em sua pesquisa valor menor de pH sendo de 7,2; a umidade do cimento desta pesquisa foi o maior do que os comparados, sendo de 5,09%, já a menor umidade foi de 0,23% encontrada por Guimarães (2017).

No estudo de Kohara e Boina (2017) o lodo de curtume possuiu características como: 79,8% de ST, 20,2% de umidade, que é considerada alta quando comparada a obtida na presente pesquisa, e pH igual a 12. Enquanto Guimarães (2017) encontrou valores bem mais próximos, para sólidos totais: 98,2% no cimento, 99,8% na areia e 98,2% no lodo de curtume; já em relação à umidade os valores foram diferentes o autor encontrou 0,23% na areia e foi sua menor umidade, 1,81% para o lodo e 1,74% para o cimento; e por fim os valores de pH encontrados por ele, foram: 8,2 para o lodo, 8,3 para a areia e 7,2 para cimento.

Cavalcante (2021) obteve para o cimento 98% de ST, 2% de umidade e 12,08 para o pH e para a areia: 97,6% de ST, 2,4% de umidade e 9,94 para o pH; e Paixão (2019) encontrou 99,98% de ST e 7,72 de pH para a areia e para o cimento 99,97% de ST e 14,24 para o pH, ambos estudaram o resíduo sólido de laboratório.

Em relação ao lodo de curtume, Guimarães (2017) obteve o valor de sólidos totais e de pH mais próximos sendo de 98,2% e 8,2, respectivamente; e os valores encontrados foram de 92,94% de ST e do pH 8,38. Já Kohara e Boina (2017) tiveram uma baixa porcentagem de sólidos totais, 79,8%, comparado aos outros, e a umidade foi maior que as outras encontradas, foi de 20,2%.

5.2.SÓLIDOS TOTAIS E FRAÇÕES, UMIDADE E pH DOS MATERIAIS ESTABILIZADOS POR SOLIDIFICAÇÃO

Na Tabela 12 estão os resultados das análises realizadas para os sólidos totais e suas frações, além da umidade nos materiais estabilizados por solidificação.

Tabela 12 – Sólidos totais e umidade após o tratamento do lodo de curtume através da E/S.

Experimento	Fator Real do Tempo (dias)	Fator Real da Porcentagem de RSLC (%)	ST (%)	STV (%)	STF (%)	U (%)	pH
1	7,0	10	97,64	4,19	95,81	2,36	10,70
2	28,0	10	98,26	4,07	95,93	1,74	10,63
3	7,0	30	97,95	4,86	95,14	2,05	11,29
4	28,0	30	98,53	4,57	95,43	1,47	10,75
5	17,5	20	98,40	4,54	95,46	1,60	11,07
6	17,5	20	98,40	4,53	95,47	1,60	11,14
7	17,5	20	98,82	4,49	95,51	1,18	10,61

LEGENDA: ST: Sólidos Totais; STF: Sólidos Totais Fixos; STV: Sólidos Totais Voláteis; U:Umidade; *Valor em função dos sólidos totais.

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Observado os dados da tabela 12 verifica-se que os materiais dos tratamentos apresentaram altos teores de sólidos totais e baixos percentuais de umidade. Constata-se que mesmo com a adição de diferentes porcentagens do lodo de curtume e da variação de dias, o material tratado manteve características semelhantes as dos aglomerantes, apresentando uma alta porcentagem dos sólidos totais e uma baixa porcentagem de umidade.

Lima (2018) afirma que para o resíduo sólido manter estabilidade, quando passar pelo processo de aterro, depende dos sólidos totais. Analisando a tabela 12, podemos observar que os sólidos totais apresentam valores altos e bem próximos, independente da porcentagem e do tempo de cura. Observa-se também que mesmo com a adição do lodo de curtume aos aglomerantes, as características mantiveram valores parecidos.

Comparando com Paixão (2019), que teve o Resíduo Sólido de Laboratório como estudo, ele obteve que o aumento da porcentagem do resíduo de 0% à 20% se tem uma perda de 0,26% nos sólidos totais, já na umidade ocorre um aumento de 0,26% quando a porcentagem do resíduo aumenta de 0% para 20%.A tabela 12 mostra que nos

experimentos do tempo de cura de 7 dias, os sólidos totais foram menores comparados aos outros experimentos e as umidades foram maiores, sendo no máximo 2,36%; os sólidos totais do tempo de cura de 7 dias para os demais experimentos teve um aumento de 0,85% e para a umidade teve uma perda de 0,7%; os valores dos demais experimentos, tanto dos sólidos totais como das umidades, ficaram bem mais próximos.

Analisando a tabela 12 observa-se que o pH do presente trabalho apresentou-se com média de 10,84, indicado ser um material alcalino. Guimarães (2017) que também tratou o lodo de curtume obteve pH 7,2, indicando um teor neutro do resíduo sólido. Já Cavalcante (2021) e Paixão (2019) tratando o resíduo sólido de laboratório encontraram respectivamente pH 6,21 e 5,60 indicando pH de caráter ácido do resíduo.

5.2.1 Análise variância (ANOVA): sólidos totais

A Tabela 13 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de sólidos totais dos materiais estabilizados por solidificação.

Tabela 13 - Análise de variância dos resultados de Sólidos totais dos materiais E/S.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor P
Linear	2	0,4441	0,2220	5,66	0,096
t (dias)	1	0,0841	0,0841	2,14	0,239
% RSLC	1	0,3600	0,3600	9,18	0,056
t (dias)*%RSLC	1	0,0004	0,0004	0,01	0,926
Curvatura	1	0,3916	0,3916	9,98	0,051
Erro	3	0,1176	0,0392		
Total	7	0,9537			

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSLC: Resíduo sólido de lodo de curtume; t: Tempo *Valor P: $p \leq 0,10$ médias significativamente diferentes, $p > 0,10$ diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 13, as análises de variância dos sólidos totais mostram que os valores de p para o tempo, porcentagem e interação foram respectivamente 0,239; 0,056 e 0,926. Assim apenas o valor de p para porcentagem de resíduo foi menor que o nível de significância adotado ($p \leq 0,10$). Com isso, pode-se afirmar que a diferença estatística é significativa em relação ao %RSLC. Como o valor de p para a curvatura foi de 0,051 ($p \leq 0,10$) pode-se afirmar que o modelo que melhor representa os dados é o modelo quadrático.

5.2.1.1 Modelo e Gráfico para o teor de Sólidos Totais

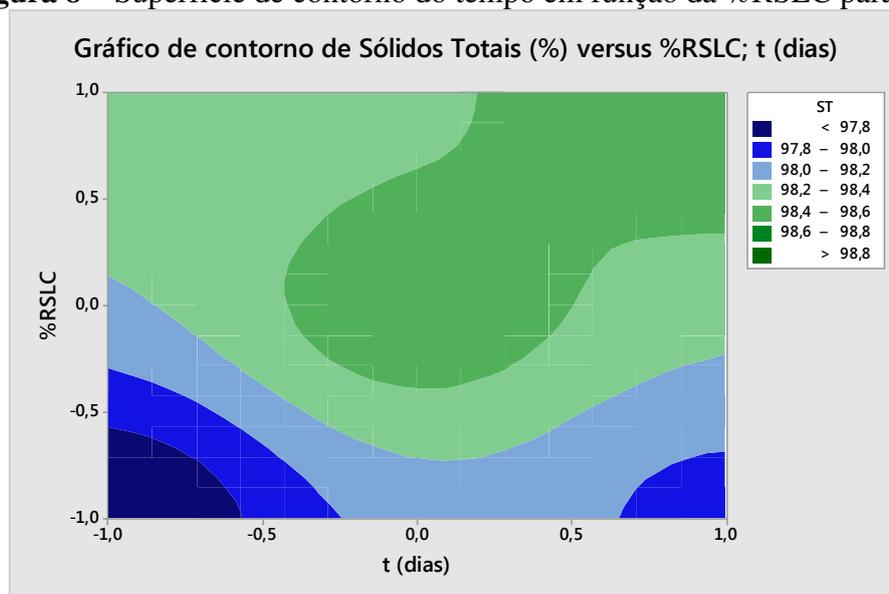
Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos sólidos totais(ST) em função do tempo e do percentual de RSLC, obteve-se o perfil representada na equação 12:

$$ST(\%) = 98,0950 + 0,1450 t(\text{dias}) + 0,3000 \%RSLC - 0,0100 t(\text{dias}) * \%RSLC + 0,442 Ct Pt \quad \text{Eq.(12)}$$

O Coeficiente de determinação (R^2) é uma das formas utilizadas para avaliar a qualidade do ajuste da reta de regressão, sendo explicada pelo modelo quadrático. Quanto mais próximo de 1 (100%) mais explicativo é o modelo. O modelo da presente pesquisa explicou 87,66%, e teve o R^2 ajustado com valor de 71,21%, que no caso foi menor que o R^2 .

O gráfico obtido para o teor de sólidos totais está apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Superfície de contorno do tempo em função da %RSLC para ST.



Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Analisando as curvas de contorno obtidas na Figura 8 constatou-se que as maiores porcentagens de sólidos totais estão apresentadas para o tempo de cura mediano, de 17,5 dias; conforme mostra bem ao meio da figura. Nota-se ainda que à medida que se aumenta o tempo de cura observou-se um aumento na porcentagem de sólidos totais.

Cavalcante (2021) estudou o teor de sólidos totais em materiais com RSL e estabilizado por solidificação sendo submetidos a diferentes temperaturas (6,28 e 50°C)

e diferentes %RSL (10; 27,5 e 45%), concluindo que o maior valor de sólidos totais (98,4%) foi encontrado no experimento de maior temperatura (50°C) e menor percentual de resíduo (10%), isso pode acontecer porque quando aumenta a temperatura aumenta também a evaporação da água, assim diminuindo a umidade. O menor valor de sólidos totais (88,40%) foi encontrado quando foi utilizado a menor temperatura (6°C) e o maior percentual do RSL(45%).

Brasil (2019) estudou estabilização por solidificação com temperaturas (6 e 22°C) e percentuais de RSL (10 e 30%) em sua pesquisa e obteve a mesma observação que Cavalcante (2021), onde o maior valor de sólidos totais (97,47%) foi encontrado na utilização da maior temperatura (22°C) e menor percentual de RSL (10%).

Paixão(2019) ao realizar a análise de sólidos totais em materiais E/S submetidos a diferentes concentrações de resíduos sólidos de laboratório (0, 5, 10 e 20%) e diferentes tempos (5, 10, 24 e 30 dias) observou-se que a % de RSLC influenciou na variável de resposta (sólidos totais).

5.2.2 Análise Variância (ANOVA): STF

A Tabela 14 mostra a ANOVA para os resultados do ensaio de STF dos materiais E/S, baseado nos resultados da Tabela 14.

Tabela 14- Análise de variância dos resultados de STF.

Tabela 14- Análise de variância dos resultados de STF.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor P
Linear	2	0,3842	0,1921	274,46	0,004
t (dias)	1	0,0420	0,042	60,04	0,016
% RSLC	1	0,3422	0,3422	488,89	0,002
t (dias)*%RSLC	1	0,0072	0,0072	10,32	0,085
Curvatura	1	0,0162	0,0162	10,32	0,040
Erro	2	0,0014	0,0007		
Total	6	0,4091			

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSL: Resíduo sólido de laboratório; T: Temperatura* Valor P: $p \leq 0,10$ médias significativamente diferentes, $p > 0,10$ diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 14, as análises de variância dos STF mostram que os valores de p para o tempo, porcentagem de RSLC e a interação

entre os dois fatores foram respectivamente 0,016; 0,002 e 0,085. Esses resultados foram menores que o nível de significância adotado ($p \leq 0,10$).

Com isso, pode-se afirmar com 90% de confiança que a diferença estatística é significativa entre os tratamentos utilizados. Visto que o valor de p para a curvatura foi 0,040 pode-se afirmar que o modelo que melhor representa os dados é o modelo quadrático.

5.2.2.1 Modelo e Gráfico para o teor de Sólidos Totais Fixos

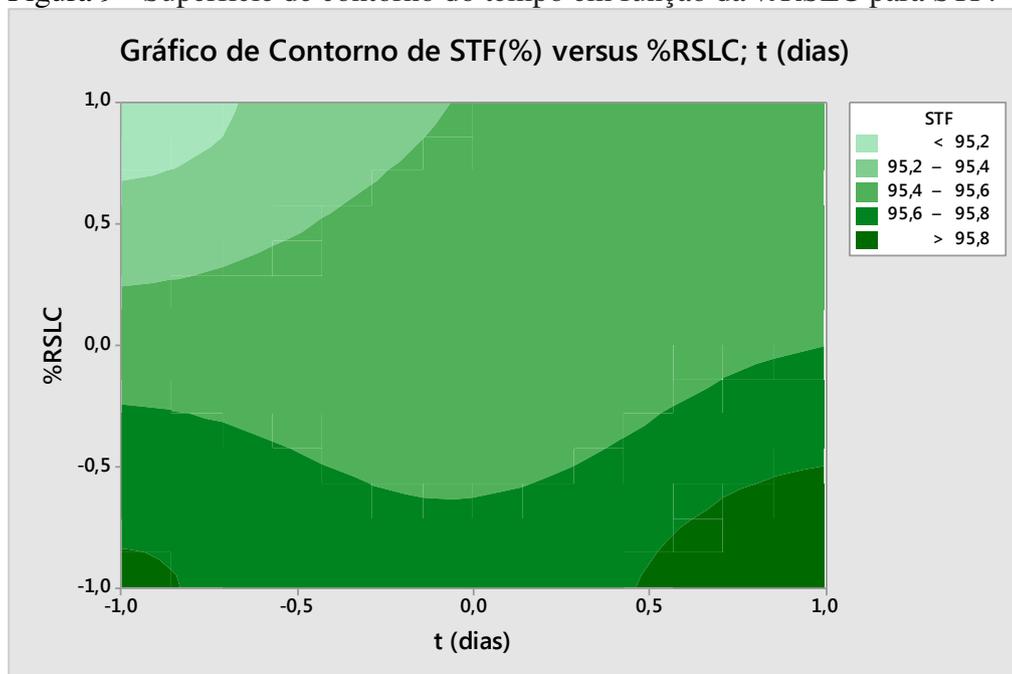
Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos sólidos totais fixos (STF) em função do tempo e do percentual de RSLC, obteve-se o perfil representada na equação 13.

$$\text{STF} = 95,5775 + 0,1025 t - 0,2925 \% \text{RSLC} + 0,0425 t^* \% \text{RSLC} - 0,0975 Ct Pt \quad \text{Eq. (13)}$$

O modelo da Eq. 13 representa um modelo quadrático já que o valor de p da curvatura foi de 0,040 ($\geq 0,10$).

O gráfico obtido para o teor de sólidos totais fixos está apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Superfície de contorno do tempo em função da %RSLC para STF.



Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Analisando as curvas de contorno que estão presentes na Figura 9 observa-se que os maiores valores de STF são quando se utiliza menor tempo e menor %RSLC, e também quando se utiliza menor tempo e maior concentração. O menor valor de STF deriva do maior tempo de cura e menor porcentagem de resíduo.

Brasil (2019) e Cavalcante (2021) realizaram a análise de sólidos totais fixos nos materiais E/S com diferentes temperaturas e diferentes percentuais de resíduo sólido, e chegaram à conclusão de que com o aumento do percentual de resíduo, causa uma diminuição no percentual de sólidos totais fixos, e conseqüentemente quando diminui o percentual de resíduo, aumenta o teor de STF.

5.2.3 Análise Variância (ANOVA): STV

A Tabela 15 mostra a ANOVA para os resultados do ensaio de STV dos materiais E/S, baseado nos resultados da Tabela 15.

Tabela 15- Análise de variância dos resultados de STV.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor P
Linear	2	0,3842	0,1921	274,46	0,004
t (dias)	1	0,0420	0,0420	60,04	0,016
% RSLC	1	0,3422	0,3422	488,89	0,002
t (dias)*%RSLC	1	0,0072	0,0072	10,32	0,085
Curvatura	1	0,0162	0,0162	10,32	0,040
Erro	2	0,0014	0,0007		
Total	6	0,4091			

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSL: Resíduo sólido de laboratório; T: Temperatura* Valor P: $p \leq 0,10$ médias significativamente diferentes, $p > 0,10$ diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 15, as análises de variância dos STV mostram que os valores de p para o tempo, porcentagem de RSLC e a interação entre os dois fatores foram respectivamente 0,016; 0,002 e 0,085. Esses resultados foram menores que o nível de significância adotado ($p \leq 0,10$).

Com isso, pode-se afirmar com 90% de confiança que a diferença estatística é significativa entre os tratamentos utilizados. Visto que o valor de p para a curvatura foi 0,040 pode-se afirmar que o modelo que melhor representa os dados é o modelo quadrático.

5.2.3.1 Modelo e Gráfico para o teor de Sólidos Totais Voláteis

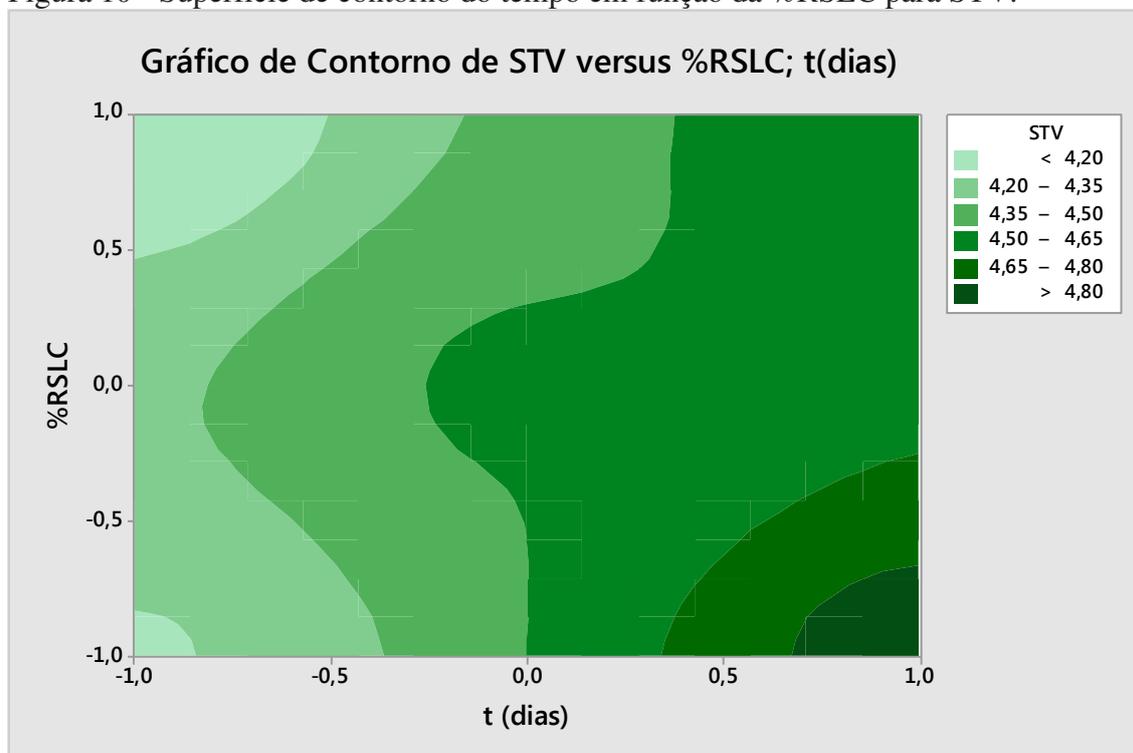
Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos sólidos totais voláteis (STV) em função do tempo e do percentual de RSLC, obteve-se o perfil representada na equação 14.

$$STV = 4,4225 - 0,1025 t + 0,2925 \%RSLC - 0,0425 t * \%RSLC + 0,0975 Ct Pt \quad \text{Eq. (14)}$$

O modelo da Eq. 14 representa um modelo quadrático já que o valor de p da curvatura foi de 0,040 ($\geq 0,10$). O gráfico gerado para o ensaio de STV está representado na figura 10.

O gráfico obtido para o teor de sólidos totais voláteis está apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Superfície de contorno do tempo em função da %RSLC para STV.



Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Analisando a Figura 10 observa-se que os menores valores de STV são quando se utiliza menor tempo e menor %RSLC, e também quando se utiliza menor tempo e maior concentração. O menor valor de STV deriva do maior tempo de cura e menor porcentagem de resíduo.

Brasil (2019) e Cavalcante (2021) realizaram a análise de sólidos totais voláteis nos materiais E/S com diferentes temperaturas e diferentes percentuais de resíduo sólido, e chegaram à conclusão de que com o aumento do percentual de resíduo, causa um aumento no percentual de sólidos totais voláteis. Brasil (2019) utilizou 10%RSL e obteve o teor de STV de 1,375 e quando utilizado 30%RSL obteve-se o teor de STV de 2,69%. E Cavalcante (2021) obteve no tratamento com 10% de RSL o resultado de 2% do teor de sólidos totais voláteis, e no tratamento com 45% de resíduo o teor de STV foi de 4%.

Comparando o teor de STF e o teor de STV percebe-se que eles são obtidos de formas opostas, enquanto o STF obtém maior valor do seu teor com a diminuição da %RS, já o maior valor obtido pelo de STV é a partir do aumento da %RS.

5.2.4 Análise Variância (ANOVA): pH

A Tabela mostra a ANOVA para os resultados do ensaio de pH dos materiais E/S, baseado nos resultados da Tabela 16.

Tabela 16- Análise de variância dos resultados de pH.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor P
Linear	2	0,2190	0,1095	1,17	0,420
t (dias)	1	0,1260	0,1260	1,35	0,329
% RSLC	1	0,0930	0,0930	1,00	0,392
t (dias)*%RSLC	1	0,0552	0,0552	0,59	0,498
Curvatura	1	0,0000	0,0000	0,59	1,000
Erro	3	0,2798	0,0932		
Total	7	0,5541			

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSL: Resíduo sólido de laboratório; T: Temperatura* Valor P: $p \leq 0,10$ médias significativamente diferentes, $p > 0,10$ diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 16, as análises de variância do pH mostram que os valores de p para a tempo, porcentagem de RSLC e a interação entre os dois fatores foram respectivamente 0,329; 0,392 e 0,498. Todos os valores foram maiores que o nível de significância adotado ($p \leq 0,10$).

Assim pode-se afirmar que a diferença estatística para o pH em relação ao tempo, %RSLC e a interação entre os dois fatores não foi significativa para os tratamentos utilizados.

O valor de p para a curvatura foi de 1,000, assim o modelo que melhor representa os dados é o modelo linear. Pode-se afirmar com 90% de confiança que os fatores tempo, %RSLC e a interação entre eles não influenciaram no valo do pH.

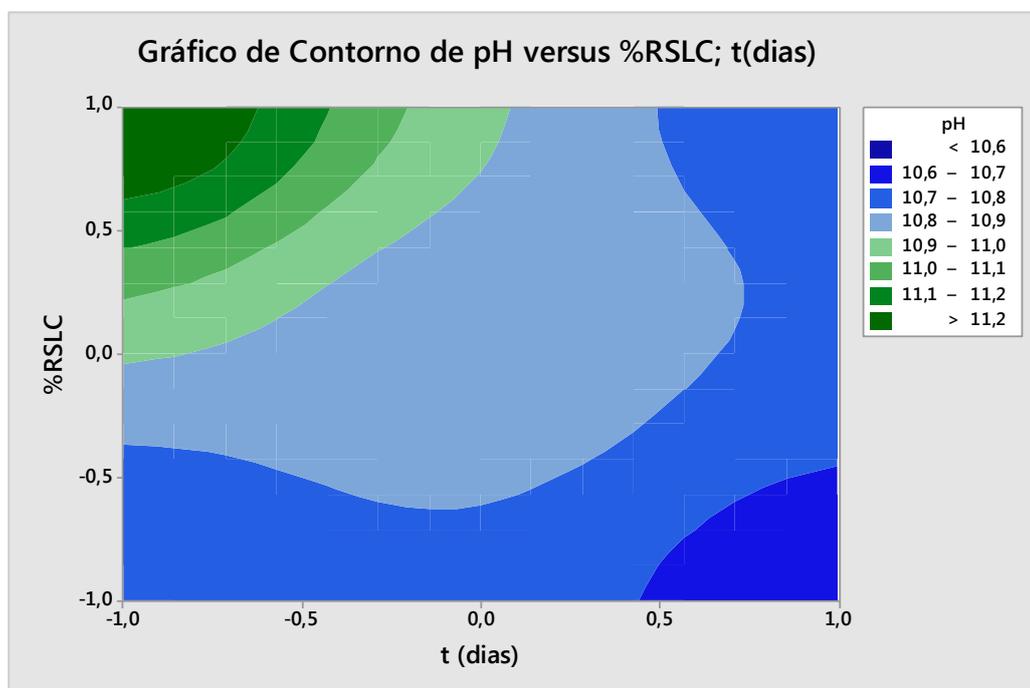
5.2.4.1 Modelo e Gráfico para o percentual de pH.

Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos percentuais dos potenciais hidrogênioônicos (pH) em função do tempo e do percentual de RSLC, obteve-se a equação 15. O modelo não é preditivo, pois, os fatores não foram significativos, esse modelo representa apenas os dados do experimento.

$$\text{pH} = 10,842 + 0,177 t - 0,152 \%RSLC - 0,118 t*\%RSLC + 0,000 Ct PtEq(15)$$

O modelo da Eq. 15 representa um modelo linear já que o valor de p da curvatura foi de 1,000 ($\geq 0,10$). O gráfico gerado para o ensaio de pH está representado na figura 11.

Figura 11- Superfície de contorno do tempo em função da %RSLC para pH.



Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Observando a figura 11 percebe-se que os maiores valores de pH ocorrem no experimentos que menor tempo de cura e maio porcentagem de resíduo sólido de lodo

de curtime, e os menores valores para pH foram encontrados com maior tempo de cura e menor percentagem.

Paixão (2019) utilizou o resíduo sólido de laboratório, e chegou à conclusão que quando aumenta a %RSL o pH diminui, ele justifica que a redução pode ser causada pelo caráter ácido do resíduo. Cavalcante (2021) realizou o estudo também com RSL, e os fatores foram temperatura e %RSLC, foi constatado que o maior valor de pH é obtido com menor percentual de resíduo, e o menor valor de pH é obtido com o maior percentual de RSL.

5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

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

A Tabela 17 está apresentando os resultados do teste de resistência à compressão dos materiais estabilizados por E/S.

Tabela 17 – Respostas do ensaio de Resistência à Compressão.

Experimento	Valor Real do Tempo (dias)	Valor Real da Porcentagem de RSCL (%)	RC (MPa)
1	7,0	10	16,586
2	28,0	10	15,437
3	7,0	30	12,690
4	28,0	30	17,136
5	17,5	20	19,384
6	17,5	20	14,538
7	17,5	20	13,089

LEGENDA: RC : Resistência à compressão.

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

De acordo com Brito (2007) tendo as matrizes cimentícias resistência à compressão superiores a 1 MPa, as mesmas apresentaram boa integridade física e, desse modo podendo ser utilizado para confecções de blocos cimentícios. Para que o material seja aprovado, ele passa por alguns critérios apresentados na tabela 18.

Tabela 18- Critérios de Integridade/Durabilidade e limite máximos permitidos.

Critério de Avaliação	Material E/S	Material E/S com Restrição	Material Solidificado	Material Estabilizado	Estabilizado com Restrição
	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)
RC	≥ 1 MPa	≥ 1 MPa	$\geq 0,8$ MPa	< 1 Mpa	< 1 Mpa

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)

Com base no protocolo de Brito (2007), temos os critérios para destinação do material E/S:

- **Utilização sem restrição (I):** o material classificado como utilização sem restrição ele foi aprovado nos ensaios de resistência à compressão, absorção de água, umidificação/secagem, lixiviação e solubilização. Esse material pode ser utilizado em material de construção e matéria de base para pavimentação.
- **Utilização com restrição (II):** o material com restrição é quando ele é aprovado nos ensaios de resistência à compressão, absorção de água, umidificação/secagem e lixiviação, mas é reprovado no ensaio de solubilização.

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

Utilização	Parâmetros de Aceitação (Resistência à Compressão)
Uso como material termoplástico (betume)	$\geq 0,9$ Mpa
Uso como material termoplástico (polietileno)	≥ 14 Mpa
Uso como material termofixo	≥ 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)

Nota:

- 1 Valor recomendado por SPENCE e SHI (2005)
- 2 Valor indicado para bloco vazado de concreto segundo ABNT NBR 7215 (1996)
- 3 Valor para material em obras de pavimentação segundo MULDER (2002)
- 4 Valor para fabricação de tijolos maciços conforme ABNT NBR 7170 (1983 d)
- 5 Valor para confecção de peças de concreto conforme ABNT NBR 6136 (1994)

A tabela 19 mostra os parâmetros de aceitação para a utilização do material estabilizado por solidificação.

- **Disposição em locais de resíduos perigosos (III)** – neste caso o material é aprovado nos ensaio de resistência à compressão, absorção de água e umidificação/secagem e reprovado no ensaio de lixiviação I, sendo assim o material segue para o ensaio de lixiviação II, se for aprovado, ele segue para a análise de solubilização. De acordo com o resultado o material vai ser classificado como solubilizado por solidificação ou solubilizado com restrição.
- **Disposição em aterro de materiais inertes (IV)** – neste tópico o material é reprovado nos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e umidificação/secagem, mas é aprovado nos ensaios de lixiviação e solubilização. O material é classificado como estabilizado e pode seguir para aterros de materiais inertes.
- **Disposição em aterro de resíduos não perigosos (V)** – ocorre quando o material é aprovado apenas no ensaio de lixiviação, ele é classificado como material estabilizado com restrição e é disposto em aterro de resíduos não perigosos.

Analisando as respostas obtidas nos ensaios de resistência à compressão todos os experimentos foram aprovados como material solidificado de acordo com a Tabela 18, todos tiveram valores superiores à 1MPa, sendo assim todos os experimentos seguem o protocolo proposto por Brito (2007). De acordo com a Tabela 19, todos os experimentos são possíveis de serem utilizados como material termoplástico (betume) por

apresentarem $RC \geq 0,9MPa$; para termoplástico (polietileno) os experimentos 1,2,4,5 e 6 podem ser utilizados; em utilização para bloco vazado em concreto apenas os experimentos: 4 e 5, não poderiam ser utilizados por apresentarem $RC > 16MPa$; para ser utilizado com material de cobertura de pavimentação os experimentos 1, 4 e 5 não podem ser utilizados por apresentarem $RC > 15MPa$; nenhum dos experimentos podem ser utilizados em: material de base de pavimentação e tijolos maciços por apresentarem $RC > 5 MPa$, e nenhum experimento também não pode ser utilizado como peça de concreto por apresentarem $RC < 35MPa$.

Guimarães (2017) também estudou o resíduo sólido do lodo de curtume. Sendo com concentrações de: 5, 15 e 25% e com o tempo de: 7, 28 e 90 dias, todas os experimentos foram estabilizados por solidificação com valores superiores à 1MPa, o menor valor foi de 3MPa e o maior foi de 6,99MPa; Já Lima (2018) e Paixão (2019) estudaram o resíduo sólido de laboratório e também tiveram seus materiais estabilizados por solidificação, todos com valores superiores à 2MPa. Cavalcante (2021) também realizou o teste de resistência à compressão com materiais, que utilizaram o resíduo sólido de laboratório, e apenas o experimento com concentração de 10% de RSL e temperatura de 6°C foi aprovado, os demais experimentos que variam com concentrações de 10, 27,5 e 45% e com temperaturas de 6, 28 e 50°C, obtiveram valores inferiores à 1MPa.

5.3.1 Análise variância (ANOVA): resistência à compressão

A Tabela 20 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de resistência à compressão dos materiais estabilizados por solidificação.

Tabela 20 - Análise de variância dos resultados de Resistência à compressão dos materiais E/S.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor P
Linear	2	3,969	1,962	0,15	0,869
t (dias)	1	1,207	1,207	0,09	0,783
% RSLC	1	2,718	2,718	0,20	0,682
t (dias)*% RSLC	1	7,826	7,826	0,59	0,499
Curvatura	1	4,126	4,126	0,31	0,616
Erro	3	39,838	13,279		
Total	7	55,713			

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSLC: Resíduo sólido de lodo de curtume; t: Tempo *Valor P: $p \leq 0,10$ médias significativamente diferentes, $p > 0,10$ diferença significativa.

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 20, às análises de variância da resistência à compressão para os valores de p para o tempo, porcentagem e interação foram respectivamente 0,783; 0,682 e 0,499. Esses valores foram maiores que o nível de significância adotado ($p \leq 0,10$). Com isso, pode-se afirmar que a diferença estatística não é significativa entre os tratamentos utilizados. O valor de p para curvatura foi de 0,616 ($p > 0,10$) pode ser afirmar que o modelo que melhor representa os dados é o modelo linear.

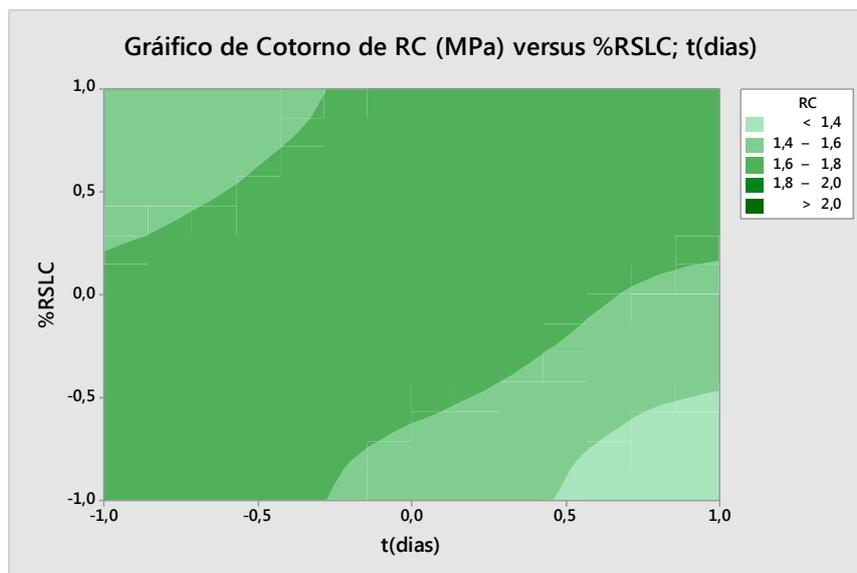
5.3.2 Modelo e gráfico para o percentual de resistência à compressão

De acordo com o modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos percentuais de Resistência à compressão (RC) em função do tempo de cura e do percentual de RSLC, obteve-se o perfil representado na equação 16. O modelo na Eq. 13 não é preditivo, não foi estatisticamente significativo.

$$RC = 15,46 - 0,55 t(\text{dias}) + 0,82 \%RSLC + 1,40 t(\text{dias}) * \%RSLC + 1,44 Ct PtEq.(16)$$

A equação representa apenas 28,50% (0,28) dos dados, ou seja, o modelo não é explicativo por ser bastante distante de 100% (1). E o valor do R^2 não foi ajustado, pois foi igual a 0%. O gráfico obtido para o ensaio de RC está apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Superfície de contorno do tempo em função da %RSLC para RC.



Fonte: Dados da pesquisa (2022)

Analisando a figura 12 pode-se observar que com a maior %RSLC e maior tempo de cura, e também quando a %RSLC e o tempo de cura são menores a resistência à compressão fica na faixa do 1,6-1,8 MPa para os dois casos. Já quando é utilizada a menor percentagem de RSLC no maior tempo de cura, se tem a menor RC.

Guimarães (2017) analisou também o lodo de curtume com tempo de cura (7, 28 e 90 dias) e percentual de RSLC (5, 15 e 25%), assim o autor observou que o melhor resultado para a resistência à compressão foi obtido com o menor tempo de cura (7 dias) e uma menor porcentagem de lodo (5%).

Pinto (2005) estudou o lodo de curtume e observou que com o aumento da percentagem do RSLC ocorre a diminuição da RC. Logo ele concluiu que a redução da RC com o aumento da percentagem do lodo de curtume é devido ao cromo, metal pesado presente no lodo, que reage com o cimento.

Paixão (2019) observou que os corpos de prova que não tinha percentagem de RSL foram os que tiveram maior RC (em média 3,93MPa), nos CPs que tinham %RSL, os de menor percentagem de RSL foram os que obtiveram maior resistência à compressão (média de 2,75MPa).

5.4 CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Na Tabela 21 estão apresentados os resultados dos ensaios de capacidade de absorção de água que foram realizados no presente trabalho.

Tabela 21 - Resultados obtidos para a capacidade de absorção de água.

Experimento	Fator codificado Tempo	Fator codificado Porcentagem de RSCL	Valor Real do Tempo (dias)	Valor Real da Porcentagem de RSCL (%)	Variável Resposta CAA (%)
1	-1	-1	7,0	10	19,13
2	+1	-1	28,0	10	15,93
3	-1	+1	7,0	30	19,89
4	+1	+1	28,0	30	16,97
5	0	0	17,5	20	18,76
6	0	0	17,5	20	18,67
7	0	0	17,5	20	18,15

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

De acordo com a ABNT NBR 9778 (1987) o limite permissível para o ensaio de CAA é de $\leq 40\%$. Assim, todos os tratamentos realizados foram aprovados com porcentagens abaixo de 19,89%, esse resultado foi o maior obtido, este derivado do experimento 3, que tem o menor tempo (7 dias) e maior percentual de RSLC (30% de RSLC).

Fazendo a comparação dos resultados de capacidade de absorção de água apresentados na Tabela 21, levando em consideração o tempo e a porcentagem de RSLC observa-se que os experimentos com maiores dias de descanso foram os com menores porcentagens de absorção de água, isso pode ser pela quantidade de dias armazenados que causa uma maior absorção de umidade, por conta disso ocorre um retardo na perda da umidade por que o experimento não absorve muita água, possuindo então uma baixa porosidade e assim tendo um baixo percentual de CAA.

Os experimentos (2 e 4) com maior tempo (28 dias), independente da porcentagem de RSLC, obtiveram menor percentual de CAA, enquanto os experimentos (1 e 3) de menor tempo (7 dias) obtiveram maior porcentagem de CAA, isso pode ser explicado pelo fato de que o experimentos 2 e 4 absorveram mais umidade por conta do tempo de cura, assim tendo menor porosidade, enquanto os experimentos 1 e 3 tiveram menos tempo de absorver umidade e tiveram uma maior porosidade.

Quando analisamos os pontos centrais que são de 17,5 dias, podemos comprovar a relação entre o tempo e a umidade, pois esses experimento obtiveram o percentual de CAA entre os experimentos 1 e 3, e os experimentos 2 e 4.

Pode-se concluir que quanto maior o tempo de cura, independente da porcentagem de RSLC, menor será o percentual de CAA do tratamento, porque gera o fator umidade que influencia diretamente na porosidade que pode facilitar ou dificultar a absorção de água.

5.4.1 Análise Variância (ANOVA): Capacidade de absorção de água

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

Tabela 22- Análise de variância dos resultados de capacidade de absorção de água.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor P
Linear	2	0,7443	0,3731	0,30	0,768
t (dias)	1	0,1122	0,1122	0,09	0,791
% RSLC	1	0,6320	0,6320	0,41	0,548
t (dias)*% RSLC	1	0,1806	0,1806	0,15	0,739
Curvatura	1	7,5300	7,5300	6,10	0,132
Erro	2	2,4675	1,2337		
Total	6	10,9224			

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSLC: Resíduo sólido de lodo de curtime; t: tempo

* Valor P: $p \leq 0,10$ médias significativamente diferentes, $p > 0,10$ diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Com base nos dados apresentados na Tabela 22, as análises de variância do percentual de CAA mostram que os valores de p para o tempo, porcentagem de RSLC e interação entre eles não foram significativos, pois foram todos $p > 0,10$.

Como o valor de p para a curvatura foi 0,132 ($p > 0,10$), então, pode-se afirmar que o modelo que melhor representa os dados é o modelo linear.

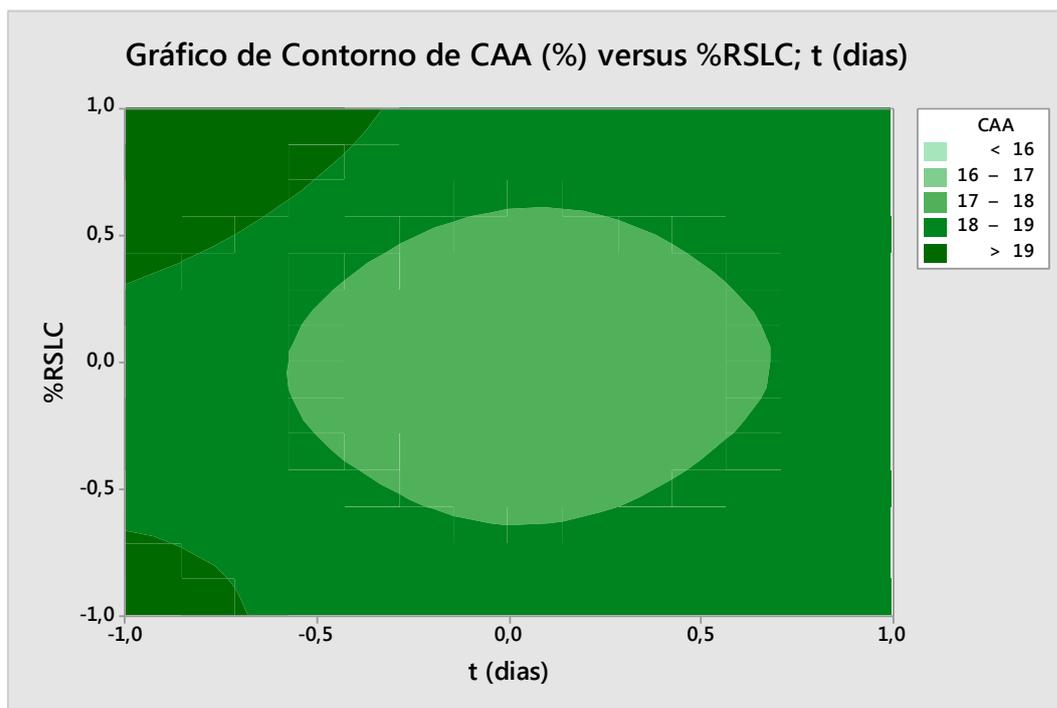
5.4.2 Modelo e Gráfico para o percentual de Capacidade de absorção de água

Com relação ao modelo ajustado que foi obtido a partir dos dados dos percentuais de capacidade de absorção de água em função do tempo e do percentual de RSLC, obteve-se a equação 17. O modelo não é preditivo, pois, os fatores não foram significativos. Esse modelo representa apenas os dados do experimento.

$$CAA(\%) = 19,113 + 0,168 t - 0,397 \%RSLC - 0,213 t * \%RSLC - 2,096 Ct PtEq (17)$$

O gráfico obtido pelo ensaio de capacidade de absorção de água está apresentado na figura 13.

Figura 13- Superfície de contorno do tempo em função do %RSLC para CAA.



Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Com base na Figura 13 pode-se observar que os maiores percentuais de CAA foram obtidos nos experimentos com 7 dias, com a menor e maior porcentagem de RSLC, mesmo esses experimentos tendo os maiores percentuais de CAA eles não foram reprovados, pois foram percentuais menores que 40%, porcentagem estabelecida.

De acordo as análises feitas observa-se que o tempo tem influencia direta no resultado do experimento, pois os testes feitos no mesmo dia com porcentagem de RSLC diferentes tiveram percentuais de CAA parecidos, enquanto quando comparado as mesmas porcentagens e diferentes dias os percentuais de CAA são opostos. Assim, conclui-se que conforme o tempo de dias aumentam os percentuais de CAA também aumentam.

Silva (2018) trabalhou apenas com a variação de porcentagem de RSL, apenas uma variável, ao realizar o ensaio de CAA com concentrações de 5, 20 e 35% de RSL, observou que os experimentos com menor porcentagem (5%) teve menor média de absorção de água (5,90%) e os experimentos com maior porcentagem (35%) obtiveram uma média maior de absorção de água (6,72%), assim podendo concluir que a porcentagem de RSL tem influência direta na absorção de água.

Paixão (2019) também trabalhou apenas com uma variável, sendo a de porcentagem de resíduo sólido de laboratório, as porcentagens foram de 5, 10 e 20%, todos os experimentos de tratamento foram aprovados, tendo percentual menor que 40% (ABNT NBR 9778,1987), observou-se que a matriz com menor porcentagem de RSL(5%) obteve menor absorção de água (8,35%) e a matriz com maior porcentagem de RSL (20%) teve o resultado de maior absorção de água (10,30%), chegando a conclusão que a porcentagem do resíduo influencia na capacidade de absorção de água.

O experimento que apresentou a maior capacidade de absorção de água foi o 2 obtendo 19,89% de CAA, onde na matriz cimentícia tinha 30% de RSLC, a maior porcentagem de RSLC, e foi analisada com 7 dias, o menor tempo de cura, enquanto que o experimento 6 foi o que obteve menor CAA (15,93%), matriz cimentícia tinha 10 % de RSLC, a menor porcentagem, e foi analisada com 28 dias, maior tempo de cura.

Os maiores e menores valores de CAA podem ser justificados pela porosidade, matrizes com menor tempo de cura tem maior porosidade, as matrizes com maior tempo de cura tem suas porosidades preenchida pela umidade ao passar dos dias, fazendo com que tenham menor absorção de água.

5.5 UMIDIFICAÇÃO E SECAGEM

De acordo com Brito (2007) para que as matrizes de cimento sejam consideradas aprovadas, a perda do peso inicial não pode ser maior que 15%. O ensaio de umidade e secagem é realizado para avaliar a durabilidade dos corpos de prova após serem submetidos a outras temperaturas.

A Tabela 23 apresenta os resultados do ensaio de umidificação e secagem dos sete tratamentos realizados.

Tabela 23- Resultados obtidos para a Umidificação e Secagem.

Experimento	Fator codificado Tempo	Fator codificado Porcentagem de RSLC	Valor Real do tempo (dias)	Valor Real da porcentagem de RSLC (%)	Variável Resposta U/S(%)
1	-1	-1	7,0	10	4,36
2	+1	-1	28,0	10	1,32
3	-1	+1	7,0	30	4,75
4	+1	+1	28,0	30	1,74
5	0	0	17,5	20	2,53
6	0	0	17,5	20	2,54
7	0	0	17,5	20	2,64

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Observou-se na Tabela 23 que no tempo de cura de 28 dias e variando a porcentagem de RSLC (10 e 30%) a U/S obteve a menor perda de massa em relação ao peso inicial dos corpos de provas. Assim, podendo garantir a aprovação das matrizes cimentícias no ensaio de U/S.

Considerando os fatores utilizados (tempo e %RSLC) observa-se que as análises feitas com menor tempo de cura (7 dias) tem maior %U/S (4,36 e 4,75%) e as análises com maior tempo de cura (28 dias) tem menor percentual de U/S (1,32 e 1,74%). Analisando os pontos centrais que tem 20% de RSLC e 17,5 dias, é constatado uma diminuição na porcentagem de U/S em comparação aos experimentos 1 e 3, que foram analisados com 7 dias e com 10 e 30% de RSLC, respectivamente.

Os resultados dos ensaios de U/S foram bastante satisfatórios, pois foram bem abaixo do valor de 15% que é valor máximo permitido. Em uma análise geral dos fatores utilizados nos experimentos conclui-se que o tempo e a porcentagem de RSLC influenciam diretamente nos valores de U/S, pois quando aumenta os dias de cura, ocorre uma diminuição na porcentagem de U/S.

Guimarães (2017) utilizou 7, 28 e 90 dias de cura e 5, 15 e 25% de RSLC, e constatou que quando o tempo de cura aumentava e a porcentagem de RSLC diminuía, menor era o percentual de U/S.

5.5.1 Análise Variância (ANOVA): Umidificação e Secagem

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

Tabela 24 - Análise de variância dos resultados de umidificação e secagem.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor P
Linear	2	4,1204	2,0602	4,53	0,181
t (dias)	1	0,0400	0,0400	0,09	0,795
% RSLC	1	4,0804	4,0804	8,97	0,096
t (dias)*%RSLC	1	0,0361	0,0361	0,08	0,805
Curvatura	1	4,6389	4,6389	10,2	0,086
Erro	2	0,9096	0,4548		
Total	6	9,7050			

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSLC: Resíduo sólido de lodo de curtime; t: Tempo

* Valor P: $p \leq 0,10$ médias significativamente diferentes, $p > 0,10$ diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa (2023)

De acordo com os dados apresentados na Tabela 24, a análise de variância da U/S mostra que apenas o valor de p para a porcentagem de RSLC foi significativa igual 0,096, pois, obteve $p > 0,10$.

Logo, para a curvatura como o valor de $p = 0,086$, ou seja, $> 0,10$, então, o modelo que melhor se ajusta é o quadrático (caso queira achar o ponto ótimo).

5.5.2 Modelo e Gráfico para o percentual de Umidificação e Secagem

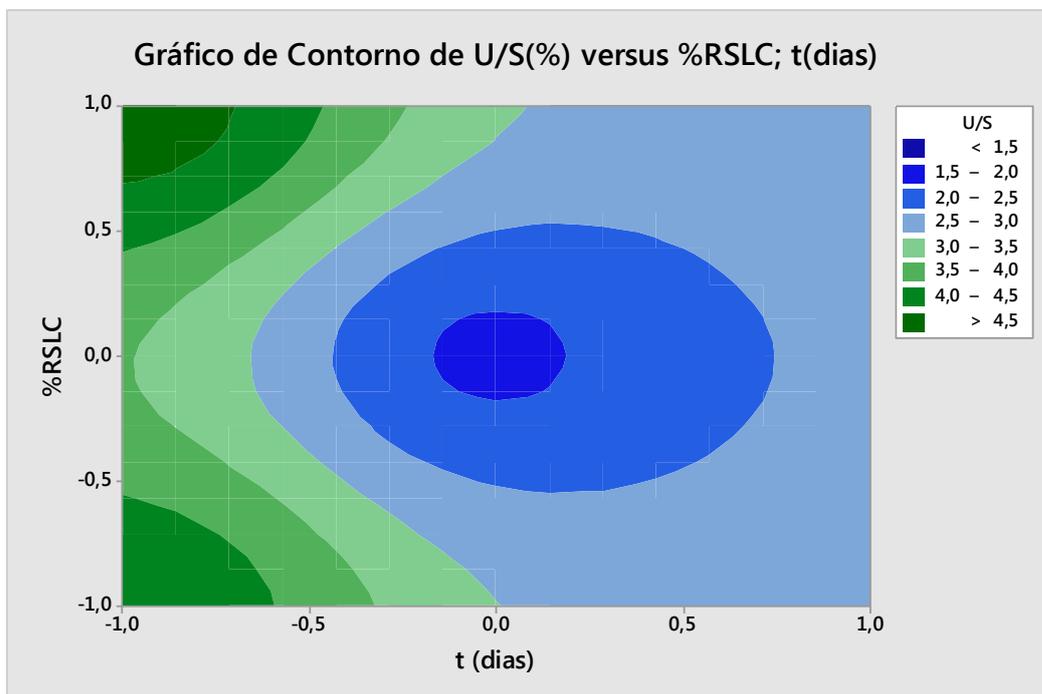
Com relação ao modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos percentuais de umidificação e secagem (U/S) em função do tempo e do percentual de RSLC, obteve-se a equação 18. O modelo não é preditivo, pois, os fatores não foram significativos, esse modelo representa apenas os dados do experimento.

$$U/S(\%) = 3,545 + 0,100 t - 1,010 \%RSLC - 0,095 t*\%RSLC - 1,645 Ct PtEq(18)$$

O modelo da Eq. 18 representa um modelo quadrático já que o valor de p da curvatura foi de 0,086 ($\geq 0,10$). O gráfico gerado para o ensaio de U/S está representado na figura 13.

O gráfico obtido para U/S está apresentado na Figura 14.

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



Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Analisando a figura 14 observa-se que com o aumento dos dias de cura ocorre a diminuição na %U/S e com a diminuição dos dias de cura tem o aumento na %U/S. com a maior percentagem de RSLC (30%) e o menor tempo de cura (7 dias) se tem a maior percentagem de umidade e secagem (4,75%), e com a menor percentagem de RSLC (10%) e maior tempo de cura (28 dias) se tem a menor %U/S (1,32%). Assim, é possível concluir que o tempo de cura influencia diretamente nas respostas dos ensaios.

Paixão (2019) trabalhou apenas com a variação da %RSL, e observou que com a menor percentagem de RSL (5%) teve o maior média percentual de U/S (1%), quando foi utilizado 10% de RSL teve uma baixa na %U/S (0,92%) e quando utilizou a maior percentagem de RSL (20%) o percentual de U/S voltou a aumentar, mas ainda assim o percentual de U/S foi menor do que o percentual de quando foi utilizado a menor %RSL.

Cavalcante (2021) trabalhou com temperatura e %RSL, foi observado que ao aumentar a temperatura o percentual de U/S diminuía, também foi constatado que os

maiores percentuais de umidade e secagem foram com a maior porcentagem de RSL (45%).

Comparando os resultados desse trabalho com os resultados de Guimarães (2017), que também utilizou resíduo sólido de curtume, observa-se que nas duas pesquisas o responsável pelo aumento ou diminuição da porcentagem de umidade e secagem, foi o tempo de cura, quando aumenta o tempo, diminui a %U/S e quando diminui o tempo, aumenta a %U/S.

5.6 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)

De acordo com a Portaria n° 2914 (2011) do Ministério da saúde e também a Resolução 430 (2011) do CONAMA, está estabelecido de limite máximo permissível para a DQO o valor da concentração de 1000 mg.L⁻¹ de efluentes que podem ser dispostos ao meio ambiente.

Na Tabela 25 estão apresentados os valores para o ensaio da demanda química de oxigênio dos extratos lixiviados das matrizes cimentícias das variáveis porcentagem (10,20 e 30%) e tempo (7; 17,5 e 28 dias).

Tabela 25- Resultados obtidos para Demanda Química de Oxigênio.

Experimento	Valor Real do Tempo (dias)	Valor Real da Porcentagem de RSLC(%)	DQO (mg.L ⁻¹)	DQO (mg.kg ⁻¹)
1	7,0	10	1.169,1	23.382,00
2	28,0	10	1.393,0	27.860,00
3	7,0	30	1.417,9	28.358,00
4	28,0	30	1.194,0	23.880,00
5	17,5	20	1.194,0	23.880,00
6	17,5	20	2.089,5	41.790,00
7	17,5	20	1.218,9	24.378,00
Bruto	0,0	0	30.790,0	61.580,00

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

De acordo com a Tabela 25, pode-se observar que não tem uma tendência em relação aos valores obtidos, o menor valor de DQO foi de 1169,10 mg.L⁻¹ do experimento 1 com menor tempo e menor porcentagem, em seguida vem o experimento

4 e 5 com valor igual de 1194,00 mg.L⁻¹, e com tempo e percentagem de 28 dias/30% e 17,5 dias/20%, respectivamente. No entanto, podemos afirmar que houve sim o tratamento, vendo que o valor da DQO bruto foi de 3079,00 mg.L⁻¹ e o maior valor da DQO do extrato lixiviado foi de 2089,50 mg.L⁻¹, no experimento 6 (17,5 dias/ 20%).

O lodo foi tratado, mesmo que não tenha chegado na concentração permitida pelo Ministério da Saúde. Levando em consideração os fatores estabelecidos: tempo (dias) e percentagem (%) do resíduo sólido de lodo de curtume incorporado nas matrizes de cimento é possível observar que não houve uma influencia direta no resultado da diminuição da concentração da DQO, ocorreu uma diminuição significativa, mas em geral não importou as variáveis.

Com os valores de DQO obtidos podemos classificar se após o tratamento o RSLC é perigoso ou não perigoso. Observou-se na Tabela 25 que houve uma redução bastante significativa da concentração dos DQO dos experimentos comparada a concentração do DQO do RSLC bruto, mesmo com a redução os experimentos foram reprovados no parâmetro de DQO, onde o valor máximo permissível é de 1000 mg/L de acordo com a MS portaria 2914 (2011) e pela Resolução CONAMA N° 430 (2011), assim todos os tratamentos foram classificados como perigosos.

Assim, podemos concluir que submeter o lodo de curtume ao tratamento em matrizes cimentícias reduz a sua concentração de DQO, pode não diminuir ao nível permitido pela MS portaria 2914 (2011) e pela Resolução CONAMA N° 430 (2011), ou seja, o tratamento não chega a ser classificado como não perigoso, mas tem uma diminuição bastante significativa como mostra essa pesquisa.

Guimarães (2017) também realizou a análise de DQO com resíduo sólido de lodo de curtume com três diferentes tempos (7, 28 e 90 dias) e três diferentes concentrações de RSLC (5, 15 e 25%), observou que quando aumentava a percentagem e mantinha o tempo, aumentava a concentração de DQO, o melhor resultado obtido de concentração de DQO foi com o menor tempo e menor percentagem de RSLC.

Cavalcante (2021) realizou análise de DQO em resíduo sólido de laboratório onde foram submetidos a três diferentes temperaturas (6, 28 e 50°C) e três diferentes concentrações de RSL (10, 27,5 e 45%), ele observou que quando aumentava a temperatura e percentagem também aumentava a concentração de DQO, na maior

temperatura (50°C) e maior percentagem (45%) foi obtido uma concentração de 3293,4 mg/L, então, ele obteve melhor resultado (2544,9 mg.L⁻¹) com menor temperatura (6°C) e menor percentagem (10%).

5.6.1 Análise Variância (ANOVA): DQO

A Tabela 26 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de DQO dos materiais E/S.

Tabela 26 – Análise de variância dos resultados da demanda química de oxigênio.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor P
Linear	2	448634	224317	19,08	0,050
t (dias)	1	327356	327356	27,85	0,034
% RSLC	1	121278	121278	10,32	0,085
t (dias)*% RSLC	1	104555	104555	8,89	0,096
Curvatura	1	67883	67882	5,77	0,138
Erro	2	23511	11755		
Total	6	644581			

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSLC: Resíduo sólido de lodo de curtume; t: dias

*Valor P: $p \leq 0,10$ médias significativamente diferentes, $p > 0,10$ diferença não significativa.

Fonte: Dados da pesquisa (2023)

De acordo com os dados apresentados na Tabela 26, as análises de variância da concentração de DQO mostram que os valores de p para tempo, concentração de RSLC e da interação entre eles foram: 0,034; 0,085 e 0,096. Onde todos os valores foram menores que o nível de significância ($p \leq 0,10$), assim, podendo concluir com 90% de confiança que a diferença estatística é significativa para as variáveis tempo, concentração de RSLC e interação entre elas.

5.6.2 Modelo e gráfico para a concentração de DQO

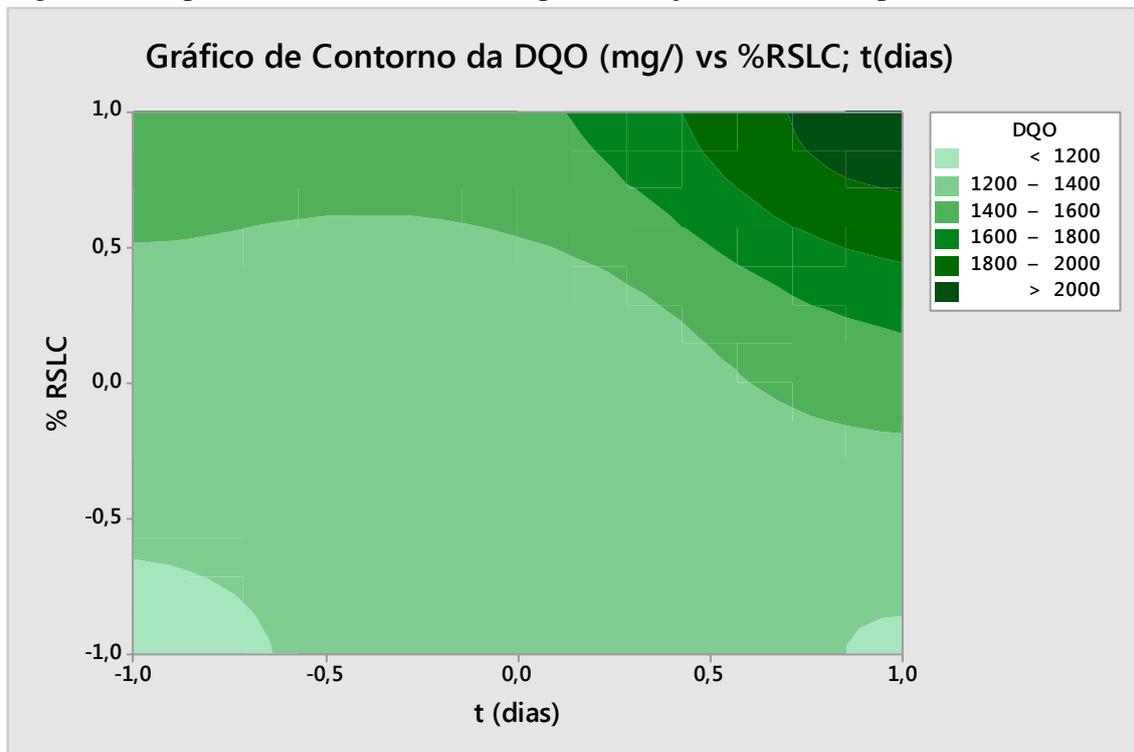
Com relação ao modelo ajustado que foi obtido a partir da regressão dos dados das concentrações de DQO (mg.L⁻¹) em função do tempo e da concentração de RSLC, obteve-se a equação 19. O valor de p para curvatura foi de 0,138, sendo representado pelo modelo linear, indicando que, caso queira encontrar o ponto ótimo, ele estará em uma região plana e linear.

$$\text{DQO (mg/L)} = 1467,6 + 286,1 t + 174,1 \% \text{RSLC} + 161,7 t * \% \text{RSLC} - 199,0 \text{ Ct Pt}$$

Eq.(19)

O gráfico obtido para o ensaio de DQO está apresentado na Figura 15.

Figura 15- Superfície de contorno do tempo em função do %RSLC para DQO.



Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Analisando a Figura 15 pode-se observar que o melhor resultado foi obtido no experimento com menor tempo e menor percentual de %RSCL, 7 dias e 10%, e o pior resultado foi com maior tempo e maior %RSCL, 28 dias e 30%. Assim é comprovado estatisticamente que de acordo com o aumento do tempo e da concentração de RSCL gera o aumento da DQO, por consequência diminui a eficiência do tratamento de E/S, e para o aumento da eficiência do tratamento é só utilizar o menor tempo e a menor concentração de RSCL.

5.7. RESULTADO DO TEOR DE CROMO TOTAL

A análise para o teor de cromo foi realizada com o intuito de avaliar a quantidade de cromo presente no resíduo sólido de lodo de curtume estudado na atual pesquisa.

A Tabela 27 está apresentando os resultados das análises de teor de cromo dos materiais E/S e do lodo de curtume bruto.

Tabela 27 – Resposta da análise do Teor de Cromo.

Experimento	Valor Real do Tempo (dias)	Valor Real da Porcentagem de RSLC (%)	Concentração do Lixiviado Tratado (mg.L ⁻¹)	Concentração do Lixiviado Tratado (mg.kg ⁻¹)
1	7,0	10	4,005	81,100
2	28,0	10	4,555	91,100
3	7,0	30	165,998	3.319,960
4	28,0	30	197,570	3.951,400
5	17,5	20	79,491	1.589,820
6	17,5	20	78,000	1.560,000
7	17,5	20	82,100	1.642,00
Bruto	0,0	0	223,082	4.461,630

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Brito (2007) apresentou uma tabela de máximos e mínimos permissíveis para lixiviação de alguns contaminantes, neste caso o cromo.

Tabela 28 – Limite máximo permitido para lixiviação do cromo.

Parâmetro (Contaminante)	Lixiviação	
	mg.L ⁻¹	mg.kg ⁻¹
Cromo	5,0	100,0

Nota: Parâmetros e limites no extrato lixiviado conforme recomendação da ABNT NBR 10005 (2004_b) e ABNT NBR 10006 (2004_c) e CFR (2003).

Fonte: Brito (2007).

Com base na Tabela 28, o valor máximo permissível de teor de cromo é de 5 mg.L⁻¹. Assim, ultrapassando esse valor, o resíduo ou matriz de tratamento é considerado reprovado, ou seja, a concentração do metal pesado presente é alta e nociva ao meio ambiente e a saúde humana.

Assim, comparando a Tabela 27 com a Tabela 8 observa-se que apenas os experimentos 1 e 2, com menor porcentagem de RSLC (10%) e variação de tempo de cura (7 e 28 dias), obtiveram valor menor que 5 mg.L⁻¹, valores esses que foram 4,005 mg.L⁻¹ e 4,555 mg.L⁻¹, respectivamente.

Os outros experimentos tiveram valores muito maiores que o permissível, isso pode ser justificado pelo aumento da %RSLC, quanto maior a porcentagem de RSLC, maior o teor de cromo presente no material. Mesmo estando acima do LMP houve uma redução significativa de como total em relação ao lodo bruto que foi de 223,082 mg.L⁻¹ (principalmente os experimentos 5, 6 e 7).

5.7.1 Análise variância (ANOVA): Teor de Cromo

A Tabela 29 apresenta ANOVA para os resultados do ensaio de teor de cromo dos materiais estabilizados por solidificação.

Tabela 29 - Análise de variância dos resultados do teor de cromo dos materiais E/S.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor P
Linear	2	32.765,6	15.882,80	3.687,97	0,000
t (dias)	1	258,00	258,00	59,90	0,016
% RSLC	1	31.507,70	31.507,70	7.316,03	0,000
t (dias)*% RSLC	1	240,60	240,60	55,86	0,017
Curvatura	1	240,60	240,60	55,86	0,014
Erro	2	8,60	4,30		
Total	6	31.312,10			

LEGENDA – GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Quadrado médio; RSLC: Resíduo sólido de lodo de curtume; t: Tempo *Valor P: $p \leq 0,10$ médias significativamente diferentes, $p > 0,10$ diferença significativa.

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 29, às análises de variância do teor de cromo para os valores de p para o tempo, porcentagem e interação foram respectivamente: 0,016 (1,6% de erro); 0,000 (0% de erro) e 0,017 (1,7% de erro). Esses valores foram menores que o nível de significância adotado ($p \leq 0,10$). Com isso, pode-se afirmar que a diferença estatística é significativa entre os tratamentos utilizados. O valor de p para curvatura foi de 0,014 ou 1,4% de significância já que o valor de $p \leq 0,10$. Pode-se afirmar que o modelo que melhor representa os dados é o modelo quadrático (caso queira encontrar o ponto ótimo ou realizar a otimização (não foi o objetivo dessa pesquisa)).

5.7.2 Modelo e gráfico para o percentual de teor de cromo

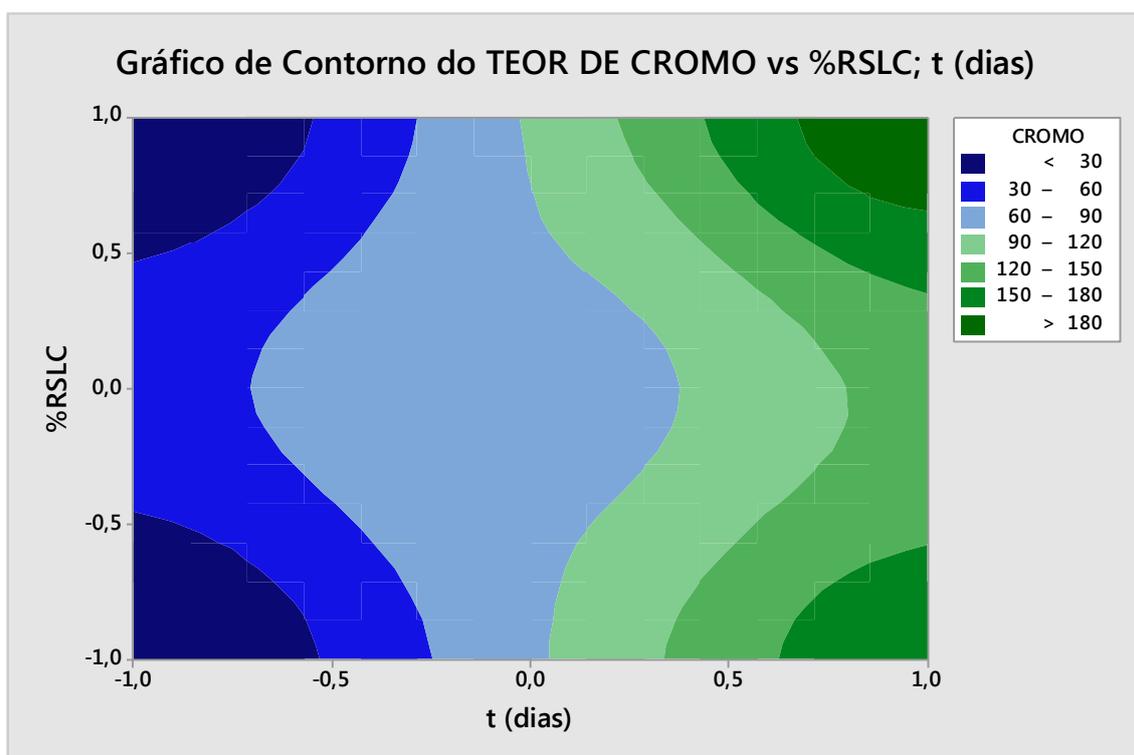
De acordo com o modelo ajustado, obtido a partir da regressão dos dados dos percentuais do teor de cromo em função do tempo de cura e do percentual de RSLC,

obteve-se o perfil representado na equação 20. O modelo na Eq. 20 é preditivo, foi estatisticamente significativo. Todos os fatores, interações e curvatura(CtPt) foram significativos.

$$\% \text{ Cromo}_{\text{Total}} = 93,03 + 8,03t + 88,75\% \text{RSLC} + 7,76 t \times \% \text{RSLC} - 13,17 \text{ Ct Pt} \quad \text{Eq. (20)}$$

O gráfico obtido para o ensaio do teor de cromo está apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Superfície de contorno do tempo em função da %RSLC para o teor de cromo.



Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Analisando a Figura 16 pode-se observar que o valor do teor de cromo vai aumentando de acordo que a porcentagem de RSLC também aumenta, quando no tratamento foi utilizado 10% de RSLC (7 e 28 dias) os valores obtidos de teor de cromo foram, $4,005 \text{ mg.L}^{-1}$ e $4,555 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente, enquanto os valores para o tratamento que utilizou 30% (7 e 28 dias), o valores foram de $165,998 \text{ mg.L}^{-1}$ e $197,570 \text{ mg.L}^{-1}$. Isso comprova que quanto maior a %RSLC, maior a concentração do metal pesado cromo.

5.8. BALANÇO DE MASSA DOS COTAMINANTES

O balanço de massa é realizado para determinar a redução em cada tratamento após a E/S em termos de massa aplicada, lixiviação e acumulação do resíduo sólido (Leite, 1997; Brito, 1999). O cálculo do balanço de massa é realizado a partir da Eq. 7.

5.8.1 Balanço de massa dos contaminantes - STV

O balanço de massa foi realizado em todos os tratamentos dos corpos de prova, os quais foram submetidos ao ensaio de sólidos totais e suas frações, a partir disso foram avaliadas a eficiência do processo de E/S para STV.

Na Tabela 30 encontram-se os valores do balanço de massa dos STV, juntamente com as massas dos STV no RSLC bruto e dos STV tratados.

Tabela 30 - Balanço de massa nos sólidos totais voláteis.

Experimento	Valor real(t)	Valor real da RSLC (%)	Massa do STV no RSLC bruto (g)	Massa do STV tratado (g)	Massa do STV retida (g)
1	7,0	10	0,87	0,21	0,66
2	28,0	10	0,87	0,22	0,65
3	7,0	30	0,87	0,24	0,63
4	28,0	30	0,87	0,25	0,62
5	17,5	20	0,87	0,2	0,67
6	17,5	20	0,87	0,23	0,64
7	17,5	20	0,87	0,22	0,65

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

De acordo com a Tabela 30, pode-se observar que o menor valor para o STV tratado foi obtido no experimento compostos por 20% de RSLC e tempo de cura de 17,5 dias, atingindo o valor de 0,20g de massa tratada, já o maior resultado foi no tratamento de 30% de RSCL e tempo de cura de 28 dias, com massa tratada de 0,25g.

Os melhores resultados de massa tratada do STV foram com 10 e 20% de RSLC e consequentemente, 7 e 17,5 dias de cura, atingindo 0,21 e 0,20g, respectivamente. Os maiores resultados de massa retida apareceram nos dois experimentos de 30% de RSLC, com 7 dias de cura obteve 0,24g e com 28 dias foram 0,25g de massa tratada.

Assim, observa-se que todos os tratamentos aprisionaram uma quantidade considerável do resíduo a matriz, mas os tratamentos que utilizaram menores %RSLC e menores tempos de cura obtiveram valores melhores de retenção. Analisando a Tabela 30 pode-se observar que quando aumenta a porcentagem de RSLC, diminui a quantidade de resíduo retido na matriz cimentícia.

5.8.2. Balanço de massa da DQO

Na Tabela 31 estão descritos os valores das massas da DQO do RSLC bruto, as massas da DQO tratada e o valor obtido no balanço de massa.

Tabela 31 - Balanço de massa do processo de E/S para DQO no extrato lixiviado.

Experimento	Valor real do tempo (t)	Valor real da porcentagem de RSLC (%)	Massa da DQO no RSLC bruto (g)	Massa da DQO tratado (g)	Massa da DQO retida (g)
1	7,0	10	5,72	2,29	3,43
2	28,0	10	5,72	2,79	2,94
3	7,0	30	5,72	2,75	2,96
4	28,0	30	5,72	2,35	3,37
5	17,5	20	5,72	2,35	3,37
6	17,5	20	5,72	4,14	1,58
7	17,5	20	5,72	2,4	3,32

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Com base na Tabela 31, observa-se que a maior massa da DQO retida foi com o menor tempo (7 dias) e menor porcentagem de RSLC (10%) sendo retido 3,43g, e o menor valor de massa da DQO retida foi no experimento 6 (17,5 dias e 20%), seguida do experimento 2 com 2,94 g de massa retida, com maior tempo de cura (28 dias) e menor %RSCL (10%).

Foi obtido baixo valor de massa da DQO tratada nos três tempos de cura (7; 17,5 e 28 dias) e nas três porcentagens de RSCL (10,20 e 30%), respectivamente: 2,29g; 2,35g e 2,35g, o experimento 1 (7 dias e 10%RSLC) foi o que obteve o menor valor de massa tratada de todos, seguido dos experimentos 4 (28 dias e 30%RSLC) e 5 (17,5 dias e 20%RSLC), que ambos tiveram o mesmo valor de massa tratada.

Mesmo que todos os tratamentos tenham retido certa quantidade do resíduo sólido, observa-se que o melhor resultado de retenção foi obtido com menor tempo de

cura e menor porcentagem de resíduo sólido de lodo de curtume, ou seja, quanto menor o tempo e a %RSLC maior vai ser a massa da DQO retida.

Para Guimarães (2017) que também utilizou o resíduo sólido do lodo de curtume, ao realizar o balanço de massa da DQO do extrato lixiviado observou que os maiores valores das massas tratadas foram obtidos com a menor porcentagem do RSLC (5%), independente do tempo de cura (7,28 e 90 dias), mas a menor massa da DQO tratada de todas foi com a menor porcentagem (5%) e menor tempo de cura (7 dias).

Silva (2018) utilizou o resíduo sólido de laboratório, mas também analisou que o maior valor de massa da DQO retida foi obtido quando utilizada a menor concentração de RSL (5%). Cavalcante (2021) que também utilizou o RSL em sua pesquisa, da mesma forma constatou que quanto menor a %RSL, maior a massa da DQO retida, neste caso foi utilizado também a temperatura, menor temperatura (6°) e menor porcentagem de RSL (10%) foi obtido maior massa da DQO retida (109,82g).

De acordo com a atual pesquisa e com outras pesquisas observa-se que todas obtiveram melhores valores de massa da DQO retida quando utilizado a menor porcentagem do resíduo sólido, tanto de laboratório quanto de lodo de curtume, e assim pode-se afirmar que o processo de tratamento de resíduo sólido perigoso é eficaz.

5.8.3 Balanço de massa do Cromo Total

O balanço de massa foi realizado para todos os tratamentos das matrizes cimentícias, experimentos esses que passaram pela lixiviação, com o intuito de verificar a estabilidade dos contaminantes que existem nas matrizes cimentícias. O ensaio de lixiviação é utilizado como base para estimar o grau de eficiência do processo em aprisionar o contaminante, neste caso o cromo, presente no resíduo após a estabilização por solidificação.

Na Tabela 32 estão os valores das massas do processo de E/S das matrizes cimentícias dos tratamentos com as concentrações de cromo no extrato lixiviado para obter o balanço de massa.

Tabela 32- Balanço de massa do Cromo Total no lixiviado.

Experimento	Valor real do tempo (t)	Valor real da porcentagem de RSLC (%)	Massa do Cromo no RSLC bruto (g)	Massa do Cromo tratado (g)	Massa do Cromo retida (g)
1	7,0	10	0,41	0,0079	0,402
2	28,0	10	0,41	0,0090	0,401
3	7,0	30	0,41	0,33	0,080
4	28,0	30	0,41	0,39	0,020
5	17,5	20	0,41	0,16	0,25
6	17,5	20	0,41	0,15	0,260
7	17,5	20	0,41	0,16	0,250

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Observou-se na Tabela 32 que as menores massas retidas (ou atenuadas) de cromo ocorreram nos experimentos 3 e 4, ambos com maior porcentagem de resíduo sólido de lodo de curtume, 0,080g e 0,020g, respectivamente. Enquanto as maiores massas retidas foram nos experimentos 1 e 2, com menor porcentagem de RSCL, as massas obtidas foram, 0,402 e 0,401, nessa ordem.

Os melhores resultados em relação a massa tratada no CP foram nos tratamentos com 10%RSLC, menor percentual, atingindo o valor de massa tratada de 0,0079 e 0,0090g. Enquanto os maiores valores foram encontrados nos tratamentos de percentual de 30%RSLC, independente do tempo de cura.

Assim observa-se que todos os experimentos tiveram retenção do cromo na matriz cimentícia, mas os experimentos com menor porcentagem (10%) atingiram maior valor de retenção. Relacionando o tempo de cura, pode-se perceber que de acordo com que o tempo aumenta a massa de cromo retida, diminui.

Guimarães (2017) obteve os valores do balanço de massa do processo de E/S a partir do cromo obtido no extrato lixiviado do RSLC com diferentes dias (7, 28 e 90 dias) e diferentes porcentagens de resíduo sólido (5, 15 e 25%), observou que as maiores massas de retenções foram com os tratamentos que utilizaram menor porcentagem de resíduo (10%); 4,4 e 4,3g de retenção, e as menores retenções foram com os tratamentos de maior porcentagem de resíduo sólido (25%); 3,86; 3,20 e 2,36g de retenção.

Silva (2018) também chegou à mesma conclusão de que quanto menor a porcentagem do resíduo sólido, maior vai ser a massa de retenção, foram obtidos valores de 198,14; 197,89 e 197,91g de retenção para os tratamentos com 5% de resíduo, contra os valores de 189,55; 189,76 e 189,94g para os tratamentos com 35% de resíduo.

Com isso, comparando a atual pesquisa com as pesquisas citadas, pode-se afirmar que o processo é eficaz ao tratar o resíduo sólido perigoso.

5.9. EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DOS CONTAMINANTES

A eficiência tem o intuito de avaliar e comparar se as massas dos agentes influenciaram na retenção dos contaminantes (Brito, 2007), ou seja, a eficiência do processo é explicada de acordo com a retenção dos contaminantes presentes nas matrizes cimentíceas. Para a eficiência do processo ser obtida utiliza-se a Eq. 8.

5.9.1 Eficiência de Retenção - STV

Na Tabela 33, estão presentes os valores das massas obtidas no processo de E/S dos CPs de todos os tratamentos com os sólidos totais voláteis.

Tabela 33- Eficiência de retenção dos sólidos totais voláteis.

Tratamento (Experimento)	Massa do RSLC (g)	Massa do Cimento (g)	Massa Bruta (mg.kg⁻¹)	Massa Tratada (mg.kg⁻¹)	Eficiência (%)
1 _{t=7 dias e 10%RSLC}	7,5	75	0,87	0,21	75,46
2 _{t=28 dias e 10%RSLC}	7,5	75	0,87	0,22	73,70
3 _{t=7 dias e 30%RSLC}	22,5	75	0,87	0,24	66,36
4 _{t=28 dias e 30%RSLC}	22,5	75	0,87	0,25	64,97
5 _{t=17,5 dias e 20%RSLC}	15,0	75	0,87	0,2	73,99
6 _{t=17,5 dias e 20%RSLC}	15,0	75	0,87	0,23	70,79
7 _{t=17,5 dias e 20%RSLC}	15,0	75	0,87	0,22	71,00

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Conforme mostra a Tabela 33, observa-se que todos os tratamentos apresentaram eficiência na retenção do resíduo no CP, reduzindo a liberação de material orgânico ao meio ambiente. O experimento que obteve maior eficiência (75,46%) foi o com menor porcentagem de resíduo sólido de lodo de curtume e menor tempo de cura, enquanto o experimento que obteve menor eficiência (64,97%) tinha a menor porcentagem de RSLC e maior tempo de cura.

Quando analisado os experimentos individualmente observa-se que a eficiência diminui apenas quando aumenta a concentração de RSLC, os tratamentos com 30%RSLC tiveram as menores eficiências: 66,365% (7 dias) e 64,97% (28 dias), enquanto a maior eficiência (75,46%) foi com 7 dias de cura e 10% de RSLC e em seguida foi a eficiência do experimento com 17,5 dias e 20%RSLC com 73,99%.

Como ocorreu com a eficiência da DQO, isso pode ter acontecido pelo excesso de %RSLC que causa saturação no CP, fazendo com que tenha uma diminuição na eficiência de retenção do STV.

Araújo Morais *et al.* (2008) utilizaram o balanço de massa de resíduos sólidos urbanos em degradação anaeróbia, e obtiveram uma eficiência em relação aos sólidos totais voláteis de 76%. Enquanto Cavinato *et al.* (2011) realizaram o balanço de massa na produção de metano para a remoção de sólidos totais voláteis e obtiveram 85% de eficiência.

Ao analisar os resultados da pesquisa com os resultados dos autores citados pode-se observar que a eficiência do processo foi bastante eficaz, onde ocorreu a retenção do RSLC nas matrizes cimentíceas.

5.9.2 Eficiência de Retenção – DQO

A eficiência do processo foi calculada usando a Equação 8 para representa os valores de retenção dos contaminantes. Na Tabela 34 são apresentados os valores das massas obtidas no processo de E/S com as concentrações de DQO no extrato lixiviado para obter a eficiência do processo.

Tabela 34 – Eficiência de retenção da matéria orgânica (DQO) no extrato lixiviado.

Tratamento (Experimento)	Massa do RSLC (g)	Massa do Cimento (g)	Massa Bruta (mg.kg ⁻¹)	Massa Tratada (mg.kg ⁻¹)	Eficiência (%)
1 - t=7 dias e 10%RSLC	7,5	75	5,72	2,29	58,0
2 - t=28 dias e 10%RSLC	7,5	75	5,72	2,79	40,2
3 - t=7 dias e 30%RSLC	22,5	75	5,72	2,75	50,5
4 - t=28 dias e 30%RSLC	22,5	75	5,72	2,35	53,2
5 - t=17,5 dias e 20%RSLC	15,0	75	5,72	2,35	53,2
6 - t=17,5 dias e 20%RSLC	15,0	75	5,72	4,14	18,4
7 - t=17,5 dias e 20%RSLC	15,0	75	5,72	2,40	52,0

LEGENDA: RSLC: Resíduo Sólido de Lodo de Curtume; CPC: Cimento Portland Comum.

Fonte: Dados da pesquisa, (2023)

Com base na Tabela 34, observa-se que a maior eficiência está no experimento 1, que foi utilizado menor tempo (7 dias) e menor porcentagem de RSLC (10%), assim o melhor resultado tanto para massa retida no balanço de massa, como na eficiência, foi do experimento com menor tempo e porcentagem. Enquanto o experimento 6 (17,5 dias e 20%) teve a menor eficiência, seguido do experimento 2, que teve maior tempo (28 dias) e menor porcentagem de RSLC.

Analisando os experimentos individualmente quanto a sua eficiência observa-se que as três maiores eficiências estão ligadas aos três tempo de cura (7; 17,5 e 28 dias) e as três porcentagens de RSLC (10, 20 e 30%), a melhor eficiência foi a do experimento 1 (7 dias e 10%) com 58%, em seguida os experimentos 4 (28 dias e 30%) e 5 (17,5 dias e 20%) com 53,2%.

Assim, podendo ser entendido que quanto menor o tempo e a porcentagem, melhor será a eficiência. Cavalcante (2021) diz que isto acontece porque com o aumento da concentração gera uma saturação, que conseqüentemente causa uma diminuição na eficiência.

Guimarães (2017) que também utilizou o lodo de curtume como resíduo sólido, chegou a conclusão de que quanto menor a porcentagem de RSCL (5%), maior a eficiência (96,9%) e maior a porcentagem (25%, menor a eficiência (65%).

Enquanto que Silva (2018) que trabalhou com resíduo de laboratório, também chegou à mesma conclusão de que menor a porcentagem do resíduo sólido (5%), maior a eficiência (99,27%). E Cavalcante (2021) que também utilizou o resíduo sólido de laboratório, teve os resultados de acordo com os autores citados anteriormente, menor percentual de RSL, maior eficiência (95,84%), e maior percentual de RSL, menor eficiência (93,95%).

Analisando e comparando os resultados obtidos dessa pesquisa com os dos outros autores citados, observa-se que teve uma eficiência, mas não tão alta quanto as citadas e comparadas.

5.9.3 Eficiência de Retenção – Cromo

A eficiência de retenção do processo é dada pelo quanto os contaminantes são retidos nas matrizes cimentíceas, calculado pela Equação 8. Na Tabela 35, estão os valores das massas do processo de E/S das matrizes cimentíceas dos tratamentos com as concentrações de cromo no extrato lixiviado para obter a eficiência do processo.

Tabela 35- Eficiência de retenção do metal pesado cromo no extrato lixiviado.

Tratamento (Experimento)	Massa do RSLC (g)	Massa do Cimento (g)	Massa Bruta (mg.kg⁻¹)	Massa Tratada (mg.kg⁻¹)	Eficiência (%)
1- t=7 dias e 10%RSLC	7,5	75	0,41	0,0079	98,00
2 - t=28 dias e 10%RSLC	7,5	75	0,41	0,009	97,75
3 - t=7 dias e 30%RSLC	22,5	75	0,41	0,33	3,27
4 - t=28 dias e 30%RSLC	22,5	75	0,41	0,39	15,00
5 - t=17,5 dias e 20%RSLC	15,0	75	0,41	0,16	57,24
6 - t=17,5 dias e 20%RSLC	15,0	75	0,41	0,15	58,04
7 - t=17,5 dias e 20%RSLC	15,0	75	0,41	0,16	55,84

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

De acordo com a Tabela 35, observa-se que todos os tratamentos apresentaram eficiência na retenção do cromo, ou seja, foi reduzida a lixiviação do metal pesado ao meio ambiente. O experimento com menos tempo de cura e menor porcentagem de resíduo sólido de lodo de curtume apresentou o maior valor de eficiência (98%) na

retenção do contaminante, enquanto quem obteve a menor eficiência (3,27%) na imobilização do contaminante foi o experimento com menor tempo de cura e maior porcentagem de RSLC.

Fazendo uma análise individual das eficiências obtidas nos tratamentos percebe-se que quanto menor a %RSLC, maior será a eficiência de retenção do processo, e a medida que vai aumentando a %RSLC, vai diminuindo a eficiência do processo de E/S, o tempo de cura não tem tanta influência.

Isso pode ocorrer pelo motivo citado nos textos de eficiência da DQO e dos STV, que é por conta do aumento da quantidade de resíduo que gera uma saturação na matriz cimentícia impedindo que o tratamento tenha uma boa eficiência. Nos experimentos de menor %RSLC, o experimento com menor tempo de cura tem maior eficiência, já nos experimentos com maior %RSLC o tratamento que obteve menor eficiência foi o de menor tempo de cura. Percebe-se que o tempo de cura não tem tanta influencia quanto a porcentagem do resíduo.

Guimarães (2017) também utilizou resíduo sólido de lodo de curtume e realizou os cálculos para a eficiência de retenção do cromo em matriz cimentícia, a maior eficiência obtida foi no experimento com 5%, menor porcentagem de RSLC, sendo 99,27% de eficiência. E a menor porcentagem de eficiência (93,88%) também foi para o experimento com 35%RSLC, maior porcentagem de resíduo.

Analisando os resultados obtidos na atual pesquisa exceto os tratamentos com 30%RSLC não obtiveram uma eficiência tão boa, mas os outros tratamentos tiveram uma alta eficiência na retenção do resíduo sólido de lodo de curtume nas matrizes cimentícias.

5.10 . APLICAÇÃO DO PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO E ROTAS DE DISPOSIÇÃO

Para definir a rota de destinação e utilização dos corpos de prova tratados é preciso analisar se eles foram aprovados no critério de integridade/durabilidade, que são: resistência à compressão, capacidade de absorção de água e umidificação/secagem. E no critério de imobilização dos contaminantes, que nesse caso foi realizado o teste de lixiviação.

Quanto ao critério de integridade/durabilidade todos os tratamentos foram aprovados, já para o teste de imobilização dos contaminantes realizado no extrato lixiviado, apenas os experimentos 1 e 2 foram aprovado, como mostra a Tabela 36.

Na Tabela 36 está presente a classificação dos materiais E/S em relação aos resultados de RC, CAA e U/S, e as concentrações dos contaminantes presentes nos extratos lixiviados dos tratamentos das matrizes cimentíceas.

Tabela 36 – Classificação dos materiais E/S.

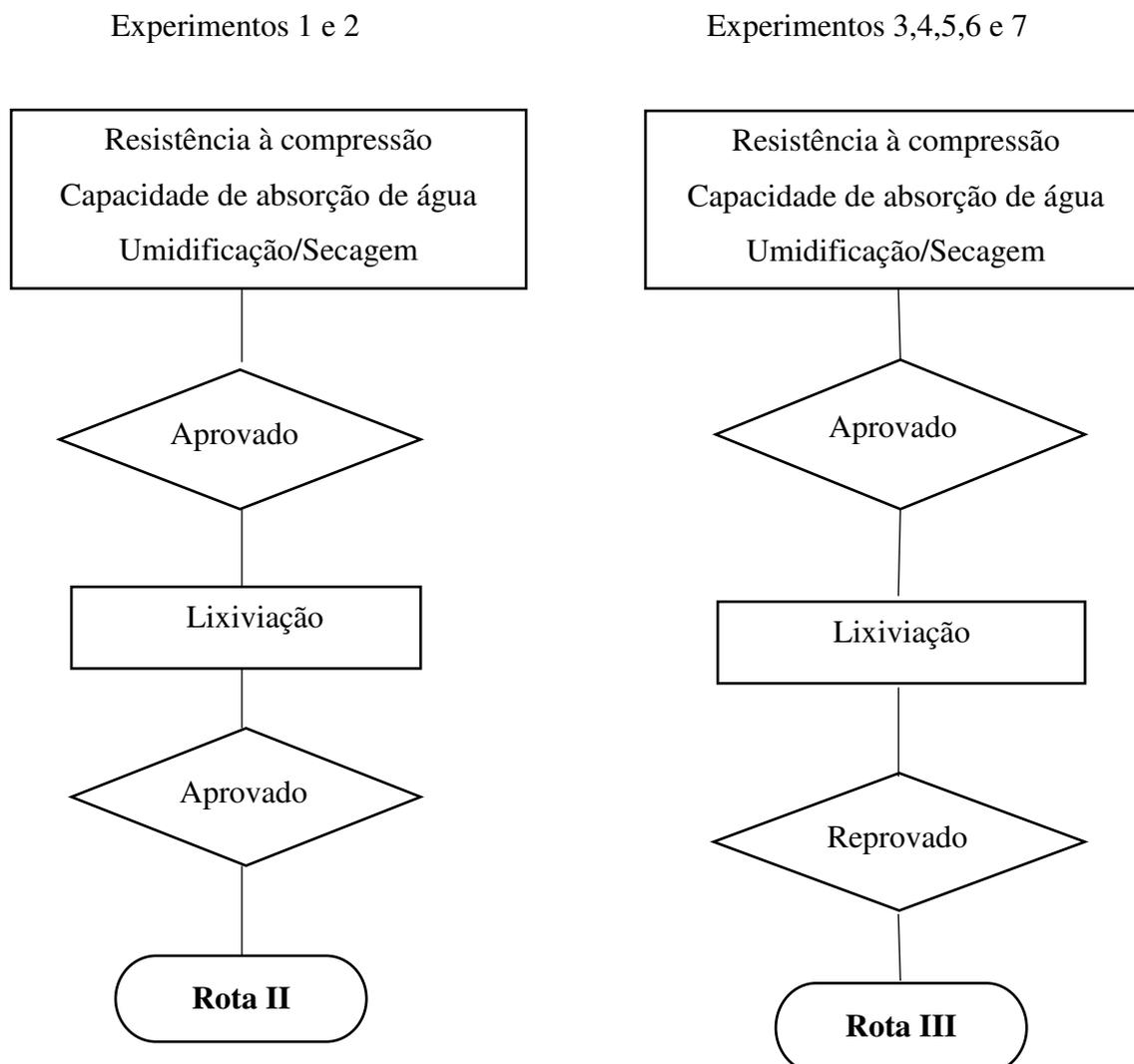
Experimento	RC	CAA	U/S	LIXIVIAÇÃO DO CROMO
1	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
2	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
3	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado
4	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado
5	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado
6	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado
7	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado

Legenda: RC: resistência a compressão; CAA: capacidade de absorção de água; U/S: umidificação e secagem.

Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Com base na Tabela 36 é possível observar que apenas os experimentos 1 e 2 foram aprovados no teste de lixiviação, assim sendo classificados como material estabilizado por solidificação com restrição. Os demais experimentos são classificados como material não estabilizado por solidificação (rota II), e são encaminhados para o Aterro de Resíduos Industriais Perigosos (rota III). De acordo com os critérios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes é possível determinar a rota de destinação. A partir da Figura 7 foram determinadas as rotas para as matrizes com 10% (7 e 28 dias), 20% (17,5 dias) e 30% (7 e 28 dias) de resíduo sólido de lodo de curtume mostrada na Figura 17.

Figura 17 – Fluxograma de Rotas de destinação final.



Fonte: Dados da pesquisa, (2023).

Como apresentado na Figura 17 as matrizes com 10% de RSLC (7 e 28 dias) foram aprovadas em todos os critérios de integridade e durabilidade, e também aprovadas no teste de imobilização dos contaminantes (referencia o Cromo). A rota II do protocolo refere-se à utilização com restrição (Rota II). Este encaminhamento ocorre quando o material for aprovado nos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e umidificação/secagem, ou seja, no critério de integridade/durabilidade e no ensaio de lixiviação. Como não foi feito o ensaio de solubilização (devido ao tempo de conclusão da dissertação), optou-se em destinar o resíduo na Rota II.

As matrizes cimentíceas com 20 e 30% de RSLC tiveram como destino final a rota III, que se refere ao aterro sanitário de Resíduos Industriais Perigosos.

Isso ocorre quando o material é aprovado nos ensaios de: resistência à compressão, capacidade de absorção de água e umidade/secagem, mas foi reprovado no teste de lixiviação que nesses casos os tratamentos tiveram valor do teor de cromo maiores que $5,00 \text{ mg.L}^{-1}$, valor esse que é o valor máximo recomendado e permitido pela ABNT NBR 10005 (2004_b) e ABNT NBR 10006 (2004_c) e CFR (2003).

Na rota III o local de disposição será em aterro de resíduos industriais perigosos, respectivamente, para célula que recebe material Classe II A ou em célula para material Classe II B, ou ainda, para local de resíduos perigosos.

6. CONCLUSÕES

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

- O resíduo sólido de lodo de curtume é um resíduo perigoso classe I. O tratamento com 10% de lodo foi convertido de classe I para classe II (não perigoso) e pode ser considerado um material E/S. Os demais, materiais tratados, com percentuais de 20% e 30% estão na forma solidificada;
- A areia, o resíduo sólido de lodo de curtume e areia apresentaram elevado teor de sólidos totais (consequentemente, baixa umidade), rico em matéria seca; e sólidos totais fixos, rico em material inorgânico;
- O tempo de cura influenciou na resposta dos ensaios de CAA e U/S, quanto maior o tempo melhor o resultado para durabilidade do tratamento. Já o ensaio de integridade, a RC, não teve influência do fator tempo e porcentagem de RSLC.
- Todas as matrizes cimentícias, do presente trabalho, foram aprovadas nos critérios de integridade e durabilidade;
- Com relação à DQO, o valor da amostra sem tratamento (bruto) foi igual $3.079,00\text{mg.L}^{-1}$ e o menor valor do experimento tratado foi igual a $1.169,10\text{mg.L}^{-1}$. Houve redução da DQO, mas os tratamentos não foram aprovados porque o valor máximo permitido para que efluente seja disposto ao meio ambiente é de 1000mg.L^{-1} , de acordo com a Portaria n° 2914 (2011) do Ministério da Saúde e da Resolução 430 (2011) do CONAMA;
- A partir dos balanços de massa observou-se que todos os tratamentos tiveram retenção (ou atenuação) da quantidade de lodo de curtume nas matrizes, onde as maiores retenções foram obtidas nos tratamentos de menor porcentagem (10%) de resíduo sólido de lodo de curtume;
- Os tratamentos que apresentaram melhores eficiências foram os dos experimentos com menor percentual de RSLC, e as menores eficiências obtidas foram dos experimentos com maior percentual de resíduo;
- Quanto à rota de disposição as matrizes cimentícias com 10% (7 e 28 dias) seguem a rota II de destinação, utilização em materiais com restrição. Enquanto as matrizes com 20% (17,5 dias) e 30% (7 e 28 dias) seguem a rota III, para o aterro de resíduos Industriais Perigosos.

REFERÊNCIAS

ACARO, S. et al. Isolantes térmicos produzidos a partir de resíduos sólidos industriais. **Cerâmica**, São Paulo, v. 62, n. 361, p. 32-37, jan./mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132016623611911>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/QYR8VqjG3TXKJYxRFtrFQ5y/abstract/?lang=pt#>. Acesso em: 10 abr. 2022.

ALMEIDA, Rafael Nunes et al. Utilização de lodo de curtume em complementação ao substrato comercial na produção de mudas de pimenta biquinho. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 18, n. 1, p. 20-33, jan./mar. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v18i1.49914>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/agraria/article/view/49914>. Acesso em: 10 abr. 2022.

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

AMORIM, Lara Letícia Galdino. Kátia Pontes Vargas Eleonora Henriques Amorim de Jesus. **Gestão Ambiental Volume 2**, p. 6.

ANDRADE, Maria Rosiane de Almeida et al. ESTUDO DA INTEGRIDADE E DURABILIDADE DE MATERIAIS ESTABILIZADOS POR SOLIDIFICAÇÃO CONTENDO LODO DE CURTUME, In: **Ciência e Engenharia de Materiais 3**. Org. Marcia Regina Werner Scneider Abdala, 2018. p. 93-103. Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/post-artigo/3703>. Acesso em: 17/12/2022.

ARAÚJO MORAIS, J.; DUCOM, G.; ACHOUR, F.; ROUEZ, M.; BAYARD, R. (2008) Mass balance to assess the efficiency of a mechanical-biological treatment. *Waste Management*, v. 28, n. 10, p. 1791-1800. Acesso me: 28/02/2023

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 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 10.006**: Solubilização de Resíduos - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.

BASEGIO, Tania et al. Environmental and technical aspects of the utilization of tannery sludge as a raw material for clay products. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 22, n. 13, p. 2251-2259, dec.2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00024-9). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0955221902000249>. Acesso em: 10 abr. 2021.

BELTRAME, Thiago F. et al. Efluentes, resíduos sólidos e educação ambiental: Uma discussão sobre o tema. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 283-294, jan./abr. 2016. DOI: 105902/2236117015827. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/viewFile/15827/pdf>. Acesso em: 10 fev. 2021.

BENÍCIO, Maria Auxiliadora da Conceição et al. Resíduos Sólidos em Santa Cruz da Venerada-PE: Descarte, Movimentação e Destino. **ID online Revista Multidisciplinar e de Psicologia**, [S. l.], v. 11, n. 36, p. 268-282, jul. 2017. DOI: <https://doi.org/10.14295/idonline.v11i36.788>. Disponível em: <https://idonline.emnuvens.com.br/id/article/view/788>. Acesso em: 24 abr. 2021.

BERILLI, Sávio Silva et al. Adubação foliar com lodo de curtume líquido no desenvolvimento e qualidade de mudas de maracujá-amarelo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 2, p. 2477-2486, june2018. DOI: 10.7127/rbai.v12n200762. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325588129_ADUBACAO_FOLIAR_COM_LODO_DE_CURTUME_LIQUIDO_NO_DESENVOLVIMENTO_E_QUALIDADE_D_E_MUDAS_DE_MARACUJA-AMARELO. Acesso em: 10 abr. 2021.

BRASIL, N. B., 2019. AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM MATERIAIS ESTABILIZADOS POR SOLIDIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE LABORATÓRIO. Graduação. 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.

CAVALCANTE, Raednos Eneas et al. **Tratamento de resíduos sólidos de laboratório utilizando a técnica de estabilização por solidificação**. 2021. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de

Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/18920>. Acesso em: 10 abr. 2021.

CAVINATO, C.; BOLZONELLA, D.; FATONE, F.; CECCHI, F.; PAVAN, P. (2011) Optimization of two-phase thermophilic anaerobic digestion of bio waste for hydrogen and methane production through reject water recirculation. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 18, p. 8605-8611. Acesso em: 28/02/2023.

CHEN, Q. Y. et al. Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: a review. **Waste management**, v. 29, n. 1, p. 390-403, jan.2009.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X08000548>. Acesso em: 10 abr. 2021.

CODE OF FEDERAL REGISTER - CFR. Appendix I. Identification and listing of hazardous waste: Proposed Rule. January, 14, 40 CFR Part 268, 2003.

CONNER, J.R. Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes.New York. Van Nostrand Reinhold, 1990. 784 p.

FREITAS, Tânia Christina Marchesi de; MELNIKOV, Petr. O uso e os impactos da reciclagem de cromo em indústrias de curtume em Mato Grosso do Sul, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 4, p. 305-310, dez. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220060040002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/CSQsJYkGtJ8zWN9YMMWNCdw/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 10 abr. 2021.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Guia técnico do setor de curtumes**. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: Feam, 2018. 58 p. Disponível em: http://biblioteca.meioambiente.mg.gov.br/publicacoes/BD%20FEAM/Guia_Curtume_Final_logo_Governo.pdf. Acesso em: 10 abr. 2021.

FURMAN, L. P. et al. SOLUÇÃO ALTERNATIVA PARA A APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE CROMO RESULTANTE DA INDÚSTRIA DE CURTUME. p. 117-122. In: **Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Blucher Chemical Engineering Proceedings**, São Paulo: Blucher, v. 1, n. 4, p. 1-6, 2017. DOI: 10.5151/chemeng-cobeqic2017-020. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/soluo-alternativa-para-a-aplicao-do-resduo-de-cromo-resultante-da-indstria-de-curtume-25691>. Acesso em: 10 abr. 2021.

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. Acesso: 28 out. 2022

GARCIA, Marcio Barreto dos Santos et al. Resíduos sólidos: responsabilidade compartilhada. **Semioses**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 2, p. 77-91, jul./dez. 2016. DOI:

<http://dx.doi.org/10.15202/1981996X.2015v9n2p77>. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2016/05/Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos-Responsabilidade-Compartilhada.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2021.

HASAN, Anik; HASHEM, Abul; PAYEL, Sofia. Stabilization of liming sludge in brick production: a way to reduce pollution in tannery. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 314, n. A, p. 1-12, 3 jan.2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125702>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182103436X>. Acesso em: 10 abr. 2021.

JUEL, Ariful Islam et al. Metals removal from thermally treated tannery sludge: A novel approach. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 16, [s. n.], dec.2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100548>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2215153221001239>. Acesso em: 10 abr. 2021.

KOHARA, Jéssica Taeko Sanches; BOINA, Welliton Leandro Oliveira. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DE LODO DE CURTUME. **ColloquiumExactarum**. [S. l.], v. 9, n. 4, p. 08-14, 2018. Disponível em: <https://revistas.unoeste.br/index.php/ce/article/view/2263>. Acesso em: 10 abr. 2021.

LI, Weihua et al. Evaluation of chemical speciation and environmental risk levels of heavy metals during varied acid corrosion conditions for raw and solidified/stabilized MSWI fly ash. **WasteManagement**, v. 87, [s. n.], p. 407-416, mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.033>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19301047>. Acesso em:

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.

MALAFAIA, Guilherme et al. Teor de nutrientes em folhas de milho fertilizado com vermicomposto de lodo de curtume e irrigado com água residuária doméstica. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 11, n. 4, p. 799-809, oct./dec. 2016. DOI: 10.4136/1980-993X. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/TpSyzYWBjtVbs8bwR8cCWgh/?lang=pt>. Acesso em: 10 abr. 2021.

MALAFAIA, Guilherme et al. Vermicompostagem de lodo de curtume em associação com esterco bovino utilizando Eiseniafetida. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, p. 709-716, dez. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020040134645>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/5M38GMJPfkr3fsTRnWvmNQs/?lang=pt>.

MARTINELLI, Leonardo et al. Influência do cromo e sódio presentes no lodo de curtume desidratado, no ganho de massas em mudas de café conilon. 2019. In: **X**

Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. 2019. Vitória – ES. p. 1-6, 2019. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/12645#preview>. Acesso em: 10 abr. 2021

MELLO, Thilly Hanna Cardoso de; SEHNEM, Simone. Gestão de resíduos sólidos: um estudo de caso na CETRIC (Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Industriais) de Chapecó-SC. **Gestão & Planejamento**, Salvador, v. 17, n. 3, p. 432-462, set./dez. 2016. DOI: 10.21714/2178-8030gep.v17i3.3537. Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/article/view/3537>. Acesso em: 10 abr. 2021.

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

PAIXÃO, Josinadja de Fátima Ferreira da et al. **Modelagem do processo de difusão de metais pesados presentes em resíduos após o tratamento de estabilização por solidificação (E/S).** 2019. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019. Campina Grande. 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/8884>. Acesso em: 10 abr. 2021.

PINTO, A. F. Estudo da estabilização por solidificação de resíduos contendo metais pesados. 229f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ROJAS, José; HEINECK, Karla. Análise física de um solo argiloso cimentado e contaminado. **Revista de Engenharia Civil EMED**, Passo Fundo, v. 4, n. 1, p. 19-31, jan./jun. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v4n1p19-31>. Disponível em: <https://seer.imed.edu.br/index.php/revistaec/article/view/1632>. Acesso em: 10 abr. 2021.

SANTOS, Pedro Vieira Souza; ARAÚJO, Maurílio Arruda. A metodologia de Produção Mais Limpa (P+L): um estudo de caso em uma indústria de Curtume. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, n. 1, p. 524-547, jan./mar. 2020. DOI: 10.19177/rgsa.v9e12020524-547. Disponível em: [https://www.semanticscholar.org/paper/A-METODOLOGIA-DE-PRODU%C3%87%C3%83O-MAIS-LIMPA-\(P%2BL\)%3A-UM-DE-Santos-Ara%C3%BAjo/53e604b04cf08fd74ac13facbf519d3e58f9a04b](https://www.semanticscholar.org/paper/A-METODOLOGIA-DE-PRODU%C3%87%C3%83O-MAIS-LIMPA-(P%2BL)%3A-UM-DE-Santos-Ara%C3%BAjo/53e604b04cf08fd74ac13facbf519d3e58f9a04b). Acesso em: 10 abr. 2021.

SCHOELER, Guilherme Pereira et al. PROPOSTA DE RECUPERAÇÃO DE ÁREA DEGRADADA DE UM CURTUME DESATIVADO NO MUNICÍPIO DE PELOTAS/RS. In: **II Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**, Foz do Iguaçu (PR), p. 1-5, maio 2019. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/XV-103.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2021.

SENFF, L.; FOLGUERAS, M. V.; HOTZA, D. Hidratação do cimento CP V ARI-RS: Influência da água nas reações de hidratação. In: **Congresso brasileiro de cerâmica**. São Pedro (SP), 2005. p. 1-12. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbc/2005/artigos/49cbc-15-05.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2021.

SILVA, Poliana Pinheiro da. **Avaliação do cromo contido em resíduo sólido de laboratório e materiais solidificados e estabilizados para confecção de blocos**. 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. 2018. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1993>. Acesso em:

SILVA, Poliana Pinheiro; BRITO, André Luiz Fiquene de; JOVELINO, Josevânia Rodrigues. Imobilização do cromo em matrizes de cimento após tratamento por estabilização/solidificação de resíduos químicos sólidos. **HolosEnvironment**, v. 21, n. 1, p. 67-82, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v21i1.12420>. Disponível em: <http://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/12420>. Acesso em: 10 abr. 2021.

SIMÕES, Veruska Nascimento; BRAGA, A. N. S.; BRITO, Andre LF. Avaliação da integridade e durabilidade de matriz de cimento contendo lodo de curtume. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 14, n. 1, p. 19-23, 2019. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/download/659/478>. Acesso em: 10 abr. 2021.

SOUIDI, F.; CHELOUAH, N.; BOUZEROURA, M. Use of calcined clay as cementitious addition in mortars to immobilize heavy metals. **Cerâmica**, v. 66, n. 380, p. 516-523, oct./dec.2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132020663802917>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/DPvGCgF85tYzk9LQsrL4yRx/?lang=en>. Acesso em: 10 abr. 2021.

SPENCE, Roger D.; SHI, Caijun. **Stabilization and solidification of hazardous, radioactive, and mixed wastes**. CRC press, 2004.

UEDA, Ana Cláudia; RUBILAR, CirdeleneSincoski; JABUR, Andrea Sartori. Avaliação da lixiviação de cromo e alumínio em matriz cimentícia contendo lodo de curtume tratado com coagulante $pg\alpha 21ca$ e sulfato de alumínio. In: 8° **FORUM INTERNACIONAL DE RESIDUOS SÓLIDOS**, 8., 2017, Curitiba. Disponível em: <http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/450>.

XIA, Wei-Yi et al. In-situ solidification/stabilization of heavy metals contaminated site soil using a dry jet mixing method and new hydroxyapatite based binder. **Journal of Hazardous Materials**, [S. l.], v. 369, p. 353-361, may. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030438941930161X>.

ZHAO, Dezhi et al. Functionalized PP fiber to improve compressive strength and solidification/stabilization performance of cement with heavy metals. **Construction and Building Materials**, v. 278, p. 122412, 2021. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2021.122412](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122412). Acesso em: 10 abr. 2021.

ZHOU, Yuchen et al. Chromium speciation in tannery sludge residues after different thermal decomposition processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, p. 128071, sep.2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128071>. Acesso em: 10 abr. 2021.