



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CCT
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA – UAEQ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA – PPGEQ
LABORATÓRIO DE GESTÃO AMBIENTAL E TRATAMENTO DE RESÍDUOS -
LABGER



TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS CONTENDO CROMO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO

WELLISON ANDRADE DE SOUSA

Campina Grande/PB

Setembro/2010

WELLISON ANDRADE DE SOUSA

**TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS CONTENDO
CROMO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO POR
SOLIDIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Recursos Regionais e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito

Campina Grande/PB

Setembro/2010



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

S725t Sousa, Wellison Andrade de
 Tratamento de Resíduos Sólidos Perigosos Contendo Cromo Através do
 Processo de Estabilização por Solidificação /Wellison Andrade de Sousa. —
 Campina Grande, 2010.
 91 f.: il. col.

 Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal
 de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.
 Orientador: Prof^o. Dr. André Luiz Fiquene de Brito.
 Referências.

 1. Resíduo Sólido. 2. Estabilização por Solidificação. 3. Cimento
 Portland. I. Título.

-CDU 628.312.1(043)

WELLISON ANDRADE DE SOUSA

**TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS CONTENDO
CROMO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO POR
SOLIDIFICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA EM ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

André Luiz F. Brito

Dr. André Luiz Fiquene de Brito

Orientador (UFCG)

Wilton Lopes de Souza

Dr. Wilton Lopes de Souza

Examinador Externo (UEPB)

Ana Cristina Silva Muniz

Dr.^a Ana Cristina Silva Muniz

Examinadora Externa (UFCG)

Campina Grande/PB

Setembro/2010

Dedico primeiramente a Deus, por ter me proporcionado à oportunidade de realizar e concluir este trabalho.

Aos meus pais Ivo Trajano e Geralda Andrade, pelo apoio em todos os momentos sempre do meu lado durante minha vida.

A minha esposa Alexandra Maria de Oliveira pela compreensão e apoio nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que nunca mediram esforços para me ajudar, sempre acreditando e me incentivando. Também por todo carinho, amor e educação que me proporcionaram.

Agradeço a minha irmã e meu irmão, os melhores amigos, por todos estes anos de dedicação, amizade e carinho.

Ao Professor Dr. André Luiz Fiquene de Brito pela amizade, orientação e dedicação no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os amigos que compõe o LABGER em especial, Clarice Oliveira, Adna Bandeira, Amanda Ramos.

Aos meus amigos estudantes de Engenharia Química, que durante os anos de formação acadêmicos estiverem sempre presentes durante as aulas.

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química PPEQ da Universidade Federal de Campina Grande, pela oportunidade de realizar este trabalho, bem como a todos os seus professores pela contribuição direta ou indireta na minha formação acadêmica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, por apoiar financeiramente a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS (RSI)	17
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS	18
2.2.1 Resíduo Classe I – Perigosos	20
2.2.2 Resíduo Classe II – Não Perigosos	20
2.3 METAL PESADO	20
2.3.1 Cromo (Cr)	21
2.4 TECNOLOGIA DE ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO (E/S)	23
2.4.1 Definição de Estabilização por Solidificação (E/S)	24
2.4.2 Uso de Cimento Portland na Estabilização por Solidificação (E/S)	25
2.5 ESTUDOS REALIZADOS NO PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO (E/S)	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 PREPARAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO SINTÉTICO (RSS)	45
3.2 CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO SINTÉTICO (RSS)	45
3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA	46
3.3.1 Planejamento Experimental	46
3.3.2 Análise Estatística dos Dados	47
3.3.2.1 Valor de P e Análise de Variância (ANOVA)	47
3.3.2.2 Modelo: Fatorial 2 ² com Ponto Central	49
3.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (CP)	50
3.5 AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS ATRAVÉS DO PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO	53
3.5.1 Ensaios de Integridade/Durabilidade	53
3.5.2 Imobilização dos Contaminantes	55
3.5.3 Cálculo da eficiência de retenção dos contaminantes	56
3.5.4. Aplicação do Protocolo de Avaliação	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO SINTÉTICO (RSS)	59

4.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA E MODELO OBTIDO PARA INTEGRIDADE/DURABILIDADE.....	60
4.2.1 Análise Estatística da Resistência à Compressão (RC).....	60
4.2.2 Análise estatística da capacidade de absorção de água (CAA).....	62
4.2.3 Análise estatística de umidificação/secagem (U/S).....	65
4.3 AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE/DURABILIDADE DO MATERIAL ESTABILIZADO POR SOLIDIFICAÇÃO (E/S).....	67
4.3.1 Avaliação da resistência à compressão (RC).....	67
4.3.2 Avaliação da capacidade de absorção de água (CAA).....	69
4.3.3 Avaliação de umidificação/secagem (U/S).....	70
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS E MODELO OBTIDO PARA IMOBILIZAÇÕES DOS CONTAMINANTES.....	71
4.4.1 Análise estatística para lixiviação.....	71
4.4.2 Análise estatística para solubilização.....	73
4.5 AVALIAÇÃO DA IMOBILIZAÇÃO DOS CONTEMINANTES DO MATERIAL ESTABILIZADO POR SOLIDIFICAÇÃO.....	75
4.5.1 Avaliação da lixiviação.....	75
4.5.2 Avaliação da solubilização.....	75
4.6 AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS E APLICAÇÃO DO PROTOCOLO.....	76
4.6.1 Critério de Avaliação: Integridade/Durabilidade.....	79
4.6.2 Critério de Avaliação: Imobilização dos contaminantes.....	80
4.6.3 Determinação da eficiência de retenção dos contaminantes.....	81
4.6.4 Rotas de Destinação dos Materiais.....	82
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	86
5.1 CONCLUSÕES.....	86
5.2 RECOMENDAÇÕES.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Fluxograma de classificação de resíduos sólidos.....	19
FIGURA 2 – Resíduo sólido sintético	45
FIGURA 3 – Aglomerante e contaminante utilizados na preparação dos corpos de prova	51
FIGURA 5 – Equipamento usado para análise resistência compressão dos CP.....	54
FIGURA 6 – Aparelho Rotativo de Frascos para Lixiviação.....	56
FIGURA 7 – Fluxograma de Avaliação de Materiais Estabilizados por Solidificação.....	58
FIGURA 8 – Sequência de avaliação para os corpos de prova A, B, C, D e E.....	84

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2 – Resistência à compressão versus tempo de cura.	32
GRÁFICO 4 – Probabilidade normal dos efeitos na resistência à compressão.....	62
GRÁFICO 5 – Probabilidade normal dos efeitos na capacidade de absorção de água	64
GRÁFICO 6 – Probabilidade normal dos efeitos na umidificação/secagem.....	67
GRÁFICO 7 – Probabilidade normal dos efeitos na lixiviação	72
GRÁFICO 8 – Probabilidade normal dos efeitos na solubilização	74

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Aspectos operacionais com seus respectivos parâmetros.....	51
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Resultados obtidos para a resistência à compressão	30
TABELA 2 – Resultados encontrados para porosidade	31
TABELA 3 – Quantidade de cromo lixiviado em cada sistema.....	31
TABELA 4 – Teor de metais nos testes de lixiviação – blocos cerâmicos contendo lodo.	34
TABELA 5 – Metais analisados nos testes de lixiviação – blocos cerâmicos com argila pura.	34
TABELA 6 – Resistência mecânica à compressão dos corpos de prova na 1ª fase da moldagem.....	35
TABELA 7 – Resistência mecânica à compressão dos corpos de prova na 2ª fase da moldagem.....	36
TABELA 8 – Concentrações obtidas na lixiviação com 30% de lodo.....	36
TABELA 9 – Resultados médios para os tratamentos A, B, C, D dos ensaios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes.	38
TABELA 10 – Resistência à compressão simples do solo/cimento/BOA.	39
TABELA 11 – Resistência à compressão (MPa) para interação % lodo versus tempo de cura	39
TABELA 12 – Resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão	40
TABELA 13 – Resultados obtidos para a capacidade de absorção de água.....	40
TABELA 14 – Resultados obtidos para a umidificação/secagem	41
TABELA 15 – Resultados obtidos para o ensaio de lixiviação – cromo	41
TABELA 16 – Resultados obtidos para o ensaio de solubilização	42
TABELA 17 – Eficiência de retenção do metal pesado cromo para lixiviação.	42
TABELA 18 – Eficiência de retenção do metal pesado cromo para solubilização.	43
TABELA 19 – Matriz de entrada dos dados do experimento no Minitab 15.0.....	46
TABELA 20 – Análise de Variância (ANOVA) para dois fatores e três pontos centrais	48
TABELA 21 – Quantidades de RSS, aglomerante e água utilizados para confecção dos CP..	50
TABELA 22 – Valor obtido para a lixiviação do cromo e seu limite máximo permissível.....	59
TABELA 23 – Resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão	60
TABELA 24 – Análise de Variância (ANOVA) para resistência à compressão.....	60
TABELA 25 – Resultados obtidos para a capacidade de absorção de água.....	62
TABELA 26 – Análise de Variância (ANOVA) para capacidade de absorção de água	63
TABELA 27 – Resultados obtidos para a umidificação/secagem	65

TABELA 28 – Análise de variância (ANOVA) para umidificação/secagem	65
TABELA 29 – Resultados obtidos para o ensaio de lixiviação.....	71
TABELA 30 – Análise de Variância (ANOVA) para lixiviação	71
TABELA 31 – Resultados obtidos para o ensaio de solubilização	73
TABELA 32 – Análise de variância (ANOVA) para solubilização	73
TABELA 33 – Critérios de integridade/durabilidade e limites máximos permissíveis	76
TABELA 34 – Limites máximos permissíveis para lixiviação e solubilização de alguns contaminantes.	77
TABELA 35 – Avaliação dos corpos de prova	78
TABELA 36 – Eficiência de retenção de metais pesados para lixiviação.....	81
TABELA 37 – Eficiência de retenção de metais pesados para solubilização	82
TABELA 38 – Utilização do material estabilizado por solidificação	85

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABETRE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ASTDM	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
ASTM	American Society for Testing Materials
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CETESB	Companhia e Tecnologia de Saneamento Ambiental
CAA	Capacidade de Absorção de Água
C₃S	Silicato de Tetracálcico
C₂S	Silicato Dicálcio
CSH	Silicato de cálcio hidratado
C₃A	Aluminato Tricálcico
C₄AF	Ferroaluminato Tetracálcico
E/S	Estabilização por Solidificação
LABGER	Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduo
FUNMINERAL	Fundo de Apoio a Mineração
RSS	Resíduo Sólido Sintético
RC	Resistência à Compressão
U/S	Umidificação/Secagem
USEPA	Agência de Proteção Ambiental Norte Americana
USACE	U. S. Armycorps of Enginners

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
Ag	Prata
As	Arsênio
A	Área
Al	Alumínio
CPII	Cimento Portland Composto
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
cm²	Centímetro Quadrado
cm³	Centímetro Cúbico
Cr	Cromo
Co	Cobalto
Cu	Cobre
Fe	Ferro
g	Gramas
Ha	Hipótese Alternativa
Hg	Mercúrio
H₀	Hipótese da nulidade
kPa	Quilo Pascal
kN	Quilo Newton
L	Litro
Mg	Magnésio
mg	Miligrama
mg.kg⁻¹	Miligrama por Quilograma
MPa	MegaPascal
Ni	Níquel
OH	Hidroxila
P	Valor de P (probabilidade: menor nível de significância)
Pb	Chumbo
pH	Potencial Hidrogeniônico
R²	Coefficiente de Determinação
R²máx	Porcentagem Máxima de Variação
R	Coefficiente de Correlação
Sb	Antimônio
Se	Selênio
T	Tempo
Zn	Zinco

RESUMO

A estabilização por solidificação é usada como uma alternativa para transformar o resíduo perigoso (Classe I) em não perigoso (Classe IIA ou IIB), antes de dispor em aterro sanitário industrial. O objetivo do trabalho será realizar o tratamento de resíduos sólidos perigosos contendo cromo pelo processo de estabilização por solidificação. O trabalho foi dividido em três etapas, na primeira o resíduo sólido sintético contendo cromo foi produzido e classificado como perigoso (Classe I). Na segunda etapa, foi realizada a estabilização por solidificação do resíduo sólido perigoso, com seus tratamentos contendo cromo, e avaliados através dos ensaios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes. Na terceira etapa foi determinada a rota de destinação do material estabilizado por solidificação. Neste trabalho foi adotado o planejamento 2² com 3 pontos centrais, os fatores adotados foram porcentagem de resíduo sólido sintético e tempo de cura. Para o fator porcentagem de resíduo foram adotados 5%, 12,5% e 20% (ponto central 12,5% de resíduo), para o fator tempo foram adotados 1, 4 e 7 dias de cura (ponto central de 4 dias). Os resultados mostraram que o resíduo sólido sintético produzido, contendo o metal cromo foi classificado como material perigoso (Classe I), estando acima do limite máximo permissível, para o ensaio de lixiviação, segundo a Norma Brasileira de Resíduos (NBR 10.005) [ABNT, 2004]. Após o tratamento o material estabilizado por solidificação, passou de perigoso (Classe I), para não perigoso (Classe II), sendo avaliado através do ensaio de solubilização como Classe IIA (não inerte). Os materiais foram aprovados no ensaio de integridade/durabilidade, atingindo resistência à compressão acima de 10 MPa para todos os corpos de prova. Na eficiência de retenção do metal pesado cromo, os resultados mostraram-se satisfatórios, com retenção para todos os tratamentos acima de 99%. Segundo o protocolo de avaliação o material final foi classificado como estabilizado por solidificação com restrição.

Palavras-chave: Resíduo Sólido, Estabilização por Solidificação, Cimento Portland.

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos industriais perigosos é atualmente assunto de grande importância no contexto nacional e internacional, o que se deve principalmente às inúmeras catástrofes ocorridas, relacionadas às falhas no seu gerenciamento (acondicionamento, armazenagem, transporte e destinação).

A grande preocupação das indústrias é o que fazer com os resíduos perigosos gerados, qual tratamento utilizar para transformar esses resíduos em não perigosos e como dispor no meio ambiente sem comprometer o mesmo. A pesquisa busca uma alternativa para esse tipo de situação por meio da estabilização por solidificação.

Uma estimativa feita pela Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos – ABETRE, informaram que dos 2,9 milhões de toneladas de resíduos industriais perigosos gerados anualmente no Brasil, somente 600 mil toneladas, cerca de 22%, recebem tratamento adequado, conforme estimativa da ABETRE. Os 78% restantes são depositados indevidamente em lixões, sem nenhum tipo de tratamento. O presidente da ABETRE, Carlos Fernandes, afirma que, dos rejeitos industriais tratados, 16% vão para aterros, 1% é incinerado e os 5% restantes são co-processados¹ (ABETRE, 2002).

SPENCE e SHI (2005) referem-se à técnica de estabilização onde ocorre reação química que reduz o potencial de risco do material, convertendo os contaminantes em formas menos solúveis, móveis ou tóxicos. A natureza física e características dos resíduos não são necessariamente alteradas por estabilização. Na solidificação refere-se à técnica de encapsulamento dos resíduos, formando um material sólido, e não envolve necessariamente uma interação química entre os contaminantes e os aditivos solidificantes.

O produto de solidificação pode ser um bloco monolítico, um material argiloso, um granulado de partículas, ou alguma outra forma física geralmente considerada sólidos (SPENCE e SHI, 2005).

¹Co – processamento de resíduos: Técnica de utilização de resíduos sólidos industriais a partir do processamento desses como substitutos parcial de matéria-prima e/ou de combustível no sistema forno de produção de clínquer, na fabricação de cimento (CONAMA, 2000).

A Agência de Proteção Ambiental Norte – Americana (do inglês *United States Environmental Protection Agency*, USEPA) tem se referido a essa tecnologia como “*a melhor tecnologia disponível comprovada*” regularizada para 57 tipos de resíduos nos Estados Unidos (SHI e SPENCE, 2004).

As indústrias geram grandes quantidades de resíduos sólidos perigosos, e entre esses resíduos se encontram os metais pesados como: Zinco (Zn), Chumbo (Pb), Níquel (Ni), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Cobalto (Co) e Alumínio (Al), provocando impactos negativos ao meio ambiente, poluindo o solo e a água. Para reduzir esses impactos a pesquisa busca uma maneira de transformar o resíduo sólido perigoso em não perigoso através da técnica de estabilização por solidificação, diminuindo a mobilidade desses resíduos antes de ser dispostos em aterros.

Justifica-se a elaboração desse trabalho pelo seguinte aspecto: i) uso do tratamento de estabilização por solidificação com o objetivo de diminuir ou transformar o material perigoso em um material não perigoso; ii) Determinar a rota de destino do material, após o tratamento de estabilização por solidificação.

Neste contexto, o presente trabalho dividiu-se em três etapas. Na primeira etapa foi produzido o resíduo sólido sintético contendo Cromo (Cr), em que deverá ser classificado como perigo – Classe I. Na segunda etapa, foi realizada a estabilização por solidificação do resíduo sólido sintético e a avaliação dos materiais, através dos ensaios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes. Na terceira etapa será determinado a rota de destino do material estabilizado por solidificação.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Realizar o tratamento de resíduos sólidos perigosos contendo cromo pelo processo de estabilização por solidificação.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar a estabilização por solidificação do resíduo sólido sintético contaminado com cromo;
- Transformar o resíduo sintético perigoso (Classe I) em não perigoso (Classe II), através do processo de estabilização por solidificação;
- Avaliar a eficiência de retenção de material perigoso a partir do material estabilizado por solidificação;
- Aplicar o Protocolo de avaliação do material estabilizado por solidificação;
- Determinar a rota de destino do material estabilizado por solidificação.

Capítulo 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004) na Norma Brasileira 10.004 (NBR 10.004), resíduos sólidos definem-se como:

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

Já o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) define resíduos sólidos industriais como:

Aqueles que resultem de atividades industriais e se encontram nos estados: sólido, semi-sólido (pastoso) ou líquido (cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível - é o caso, dos banhos exauridos de galvanoplastia e óleos lubrificantes usados). Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.

Os resíduos industriais são responsáveis por 65% a 75% do total de resíduos gerados em regiões mais industrializadas. A responsabilidade pelo manejo e destinação desses resíduos é sempre da empresa geradora. Independente da forma de destinação, a empresa prestadora de serviço é co-responsável. Quando um resíduo é destinado em um aterro, a responsabilidade também passa a ser da empresa que gerencia o aterro. Como normalmente esses resíduos são perigosos, a sua disposição deve ser dada após a classificação pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) (TENÓRIO et al., 2004).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

A classificação dos resíduos sólidos industriais é realizada com três objetivos básicos (LORA, 2000):

- i) **Caracterização:** conhecer propriedades ou características dos resíduos que possam causar algum dano ao homem e ao meio ambiente.
- ii) **Disposição:** permitir a tomada de decisões técnicas e econômicas em todas as fases do tratamento dos resíduos sólidos.
- iii) **Mobilização:** concentrar esforço da sociedade no controle dos resíduos cuja liberação para o meio ambiente seja problemática, de tal modo a permitir a tomada de decisões técnicas e econômicas em todas as fases do trato do resíduo, visando sua disposição.

O conhecimento das características do resíduo é fator de suma importância para podermos avaliar as alternativas para o tratamento e a disposição final do mesmo. Caracterizar um resíduo é, muitas vezes bastante difícil em função, principalmente, das limitações técnicas do laboratório. Em função disso, a origem do resíduo bem como os conhecimentos prévios do processo industrial que lhe deu origem, podem facilitar grandemente a sua classificação através das listagens de resíduos e substâncias NBR 10.004, ABNT (2004), cujo impacto a saúde e ao meio ambiente é conhecido.

A FIG. 1 ilustra a classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente. De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004) os resíduos são classificados como: Resíduo perigoso (Classe I) e Resíduo não perigoso (Classe II). Sendo que o resíduo Classe II são subdivididos em II A (Não Inertes) e II B (Inertes). Conforme esquematizado na FIG. 1 a norma Brasileira não faz menção à classificação dos resíduos radioativos, pois esses resíduos são de competência exclusiva da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

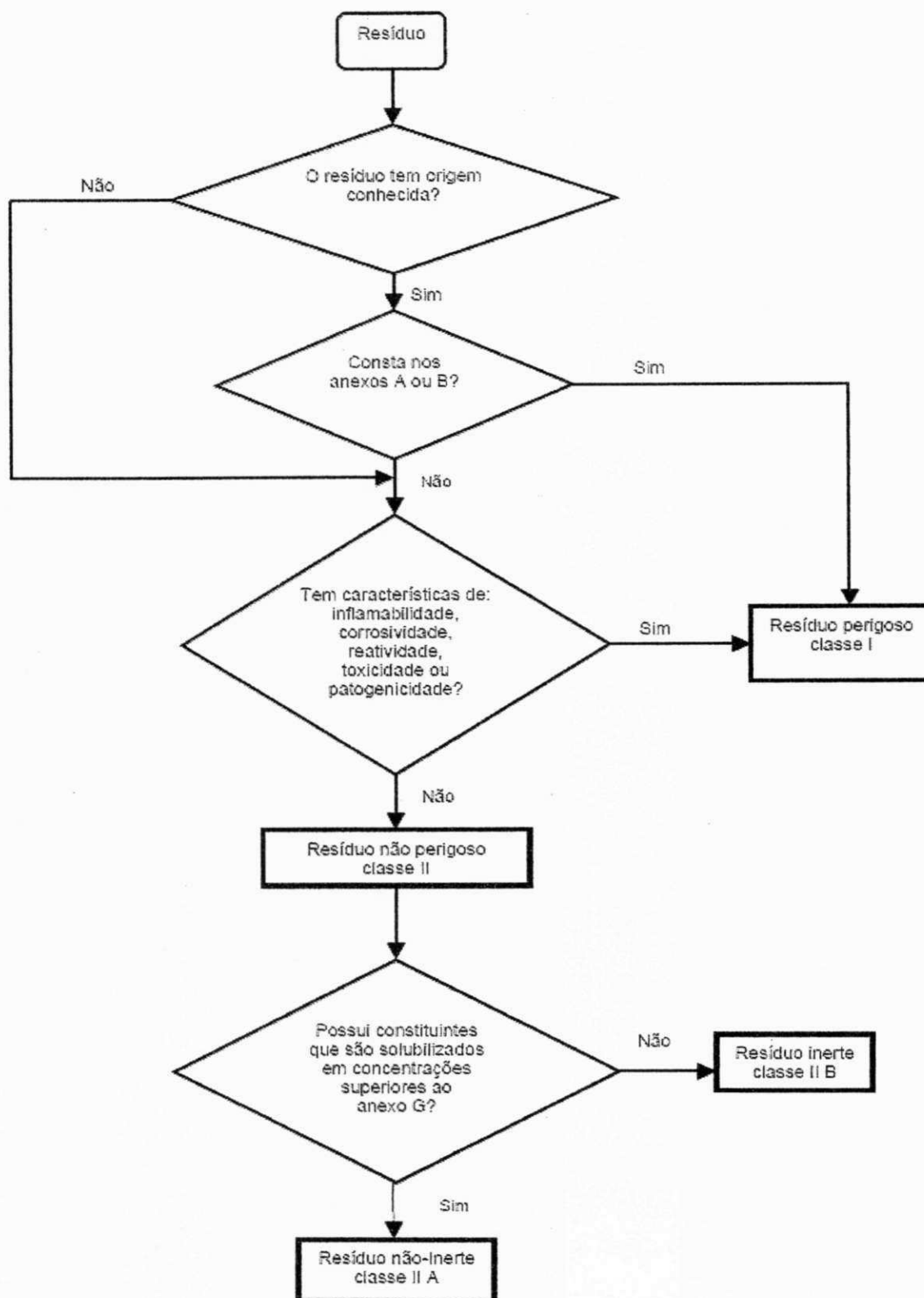


FIGURA 1 – Fluxograma de classificação de resíduos sólidos
 Fonte: NBR 10.004 (ABNT, 2004).

2.1.1 Resíduo Classe I – Perigosos

Os resíduos Classe I são os resíduos ou misturas de resíduos que, em função de suas propriedades físicas, químicas e infecto contagiosa, apresentando como uma de suas características a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo para o aumento da mortalidade ou incidência de doenças, e que apresentam riscos ao meio ambiente, quando manejados ou dispostos de forma inadequada.

2.1.2 Resíduo Classe II – Não Perigosos

Os resíduos Classe II subdivide-se em duas categorias, a saber:

a) Resíduo Classe II A – Não Inertes

São resíduos não-perigosos, que não se enquadram na Classe I – Perigosos ou na Classe II B – Inertes, podendo ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

b) Resíduos Classe II B – Inertes

São resíduos que, quando submetidos ao ensaio de solubilidade, não apresentam quaisquer de seus constituintes solubilizados, a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, exceto os padrões de aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor NBR 10.006 (ABNT, 2004).

2.3 METAL PESADO

Metal é o elemento químico que apresenta ligações químicas fortes entre seus átomos (ligação metálica) e três características físicas definidas, quais sejam: conduzir eletricidade, ter brilho, ser maleável e flexível. O que dá ao metal tais características é o arranjo regular em que se encontram os cátions, cercados por um grande número de elétrons, cuja mobilidade, confere brilho ao metal. Os metais exibem características diferentes, dependendo da

temperatura e cerca de 80 dos 110 elementos da tabela periódica são classificados como metais (BACCAN, 2004).

Metais se combinam em quase todas as proporções, formando uma vasta gama de ligas que geralmente mostram todas as características de um metal, sendo, portanto consideradas como tal (HILLERT, 1997). Ligas são combinações de elementos que não podem ser separados por meios físicos, e podem ser obtidas por processos como fundição, usinagem e extrusão, para exibir propriedades mecânicas vantajosas tais como elasticidade e resistência (HILLERT, 1997).

O aumento das atividades industriais tem intensificado o problema da poluição do meio ambiente e a deterioração dos ecossistemas pelo acúmulo de metais pesados.

Para BRITO (2009) o termo metais pesados é de definição ambígua, mas vem sendo intensamente utilizado na literatura científica como referência a um grupo de elementos amplamente associados à poluição, contaminação e toxicidade. Conceitualmente metais pesados são definidos como elementos que possuem densidade superior a 6 g.cm^{-3} ou raio atômico maior que 20. Essa definição é abrangente e inclui, inclusive, alguns ametais ou semi – metais, como As e Se. Alguns metais pesados são micronutrientes essenciais aos seres vivos como Cu, Zn, Mn, Co, Mo e Se e outros não essenciais como Chumbo (Pb), Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg), Arsênio (As), Tálcio (Ti) e Urânio (U). Para esses últimos talvez o termo metais tóxicos caíria melhor. Existem metais traços essenciais para plantas como Ferro (Fe), Zinco (Zn), Manganês (Mn), Cobre (Cu), Boro (B), Molibdênio (Mo) e Níquel (Ni). Já o Cobalto (Co), Crômio (Cr), Selênio (Se) e Estanho (Sn), não são requeridos pelas plantas, mas são essenciais para animais. Já outros como Arsênio (As), Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg) e Chumbo (Pb), não são requeridos nem por plantas, nem por animais, porém foram estudados extensivamente por serem potencialmente perigosos para plantas, animais e microrganismos.

2.3.1 Cromo (Cr)

O cromo possui uma massa atômica de 51,996 u.m.a, com forma cristalina cúbica, e muito resistente à corrosão, sendo o sétimo mais abundante metal na terra como um todo, não sendo encontrado livre na natureza (SILVA et al., 2001).

Os estados de oxidação mais comuns do cromo são: +2, +3, +4, +6. São mais estáveis as formas tri e hexavalente, além da forma elementar, aparecendo na composição de óxidos, sulfatos, cromatos, dicromatos, sais básicos e na forma elementar recobrimo peças metálicas e plásticas nos processos de tratamentos de superfície (SILVA et al., 2001).

Elemento químico usado principalmente na fabricação de aços inoxidáveis e ligas metálicas e estruturas de construção civil. Estas ligas contêm, normalmente, um teor mínimo de 12% de cromo. O cromo concede a estes materiais uma resistência à corrosão, aumento significativo da dureza da camada e resistência ao atrito e ao desgaste (GIANNETTI et al, 2001).

Os compostos de cromo, produzido nas indústrias químicas, é usado em indústrias de tratamentos superficiais, galvanização e cromação (óxido de cromo VI); manufatura de pigmentos, curtume (dicromato de sódio), promovendo o enrijecimento da pele, garantindo a preservação do produto final; tratamento de madeira onde impede o apodrecimento da mesma, mantendo-a limpa e seca, não exalando cheiros; tratamento de água e fabricação de alguns fertilizantes como os nitrogenados, fosfatados e superfosfatados (GIANNETTI et al, 2001).

A maioria dos efeitos tóxicos induzidos pelo cromo ocorre no pulmão, quando a via de introdução é o trato respiratório. Alguns efeitos sistêmicos são relatados em concentrações bastante elevadas, mas, geralmente, de menor prevalência. Os efeitos tóxicos em indivíduos expostos ocupacionalmente a elevadas concentrações de cromo, particularmente cromo (VI), incluem ulceração e perfuração de septo nasal, irritação do trato respiratório, possíveis efeitos cardiovasculares, gastrintestinais, hematológicos, hepáticos e renais, além dos riscos elevados de câncer pulmonar (SILVA et al., 2001).

Agency for toxic substances and disease registry – ASTDR relata o caso de duas pessoas que ingeriram aveia contaminada com dicromato de potássio e apresentaram sinais e sintomas agudos de intoxicação, como dores abdominais, vômitos e diarreia (ASTDR, 2000).

Após a exposição oral, os efeitos mais prevalentes ocorrem a nível hepático e renal. Os estudos de efeitos sistêmicos após a exposição por via dérmica são limitados, sendo a própria pele o local da ação tóxica (ASTDR, 2000).

No globo ocular ocorrem conjuntivites e queratites do epitélio superficial da córnea. Em nível do sistema respiratório ocorrem sintomas crônicos como rinite, laringite, pneumoconiose provocada por poeiras de cromita e asma brônquica provocada por poeiras de cromato ou névoa de ácido crômico. Nas exposições prolongadas ocorre a diminuição de hemáceas resultando uma anemia severa, além de comprometimento renal e hepático por necrose. As poeiras de cromita e de cromatos insolúveis (como de chumbo) são consideradas potencialmente carcinogênicas ao homem (TOCCHETTO, 2006).

BOLLA et al. (1990) estudaram 26 trabalhadores de uma galvânica, sendo nove cromadores e 17 polidores. Dos primeiros, sete apresentaram rinite atrófica e dois perfuração do septo nasal; dos 17 polidores, cinco apresentaram perfuração do septo nasal, três rinite

atrófica, cinco rinite subatrófica e quatro rinite hipertrófica. A rinite atrófica e a perfuração do septo nasal são danos irreversíveis.

LIMA et al. (1996) realizaram um estudo prospectivo, no estado de São Paulo, em 459 trabalhadores de 22 galvanicas. As biópsias realizadas em anodizadores, niqueladores e cromadores e os exames histopatológicos de cinco cromadores mostraram erosão, ulceração e infiltração de células inflamadas. Dos cromadores com perfuração do septo nasal desenvolveram essas lesões após 6 a 18 meses de exposição.

ASTDR (2000) relata um caso de óbito de uma criança de 14 anos de idade após a ingestão de $7,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ de dicromato de potássio. Antes do óbito, a criança apresentou fortes dores abdominais e vômito. Alto nível de enzimas hepáticas foi encontrado no soro após 24 horas da ingestão. Um exame pós-morte mostrou necrose de fígado e rins, além de edema renal.

De acordo com a Resolução nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2005), estabelece os teores máximos para os padrões de qualidade da água para metais em corpos d'água (mg.L^{-1}), classe I e classe III – água doce, para o cromo total $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$ (Cr).

A Resolução nº 397 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2008), estabelece que os padrões máximos de lançamento de efluentes para metais pesados em corpos d'água (mg.L^{-1}), para o cromo trivalente $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$ (Cr^{+3}) e cromo hexavalente $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$ (Cr^{+6}).

A Portaria nº 518, Ministério da Saúde (2004), estabelece os valores máximos permissíveis para o padrão de potabilidade para as substâncias químicas que representam risco à saúde para o cromo (Cr) igual a $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$.

Para o ensaio de lixiviação o limite máximo permissível é 5 mg.L^{-1} (100 mg.kg^{-1}) e para o ensaio de solubilização o limite máximo permissível $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$ ($0,2 \text{ mg.kg}^{-1}$), ABNT NBR 10.004 (2004) e adaptado por BRITO (2007).

2.4 TECNOLOGIA DE ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO

O processo de estabilização por solidificação constitui uma importante opção de tratamento para os quais os outros tratamentos apresentam limitações técnicas e/ou econômicas. O processo de estabilização por solidificação também é capaz de tratar as frações resultantes de outros processos, como lodos resultantes de estações de tratamentos ou de lagoas de sedimentação, e cinza tóxicas resultantes da incineração. Desta forma o processo de

estabilização por solidificação constitui, inegavelmente, uma importante área das tecnologias ambientais (SHI e SPENCE, 2004).

No relatório editado pela Agência Norte – Americana de Proteção ao Meio Ambiente, (EPA, 2001) observa-se que dos 166 projetos financiados pelo governo norte americano para descontaminar áreas poluídas por metais, 93,4% utilizam o processo de estabilização por solidificação, e o restante utiliza tecnologias como incineração, biorremediação, separação física e vitrificação.

Para STERGEMANN et al., (2002) a estabilização por solidificação com cimento Portland ou outro agente cimentante hidráulico é geralmente sugerido como o melhor tratamento para rejeitos que não podem ser eliminados ou reciclados.

MAYERS et al., (1992) salientam que a utilização de materiais cimentícios tem sido usada há décadas no tratamento final para a disposição de rejeitos químicos e radiativos. Um estudo realizado pela EPA em 1991 demonstrou que 56% dos casos de aplicação da técnica estabilização por solidificação se deu para contaminantes na forma de metais, 6% para contaminantes orgânicos e 31% para ambos.

2.4.1 Definição de Estabilização por Solidificação

Na definição de USEPA a estabilização por solidificação pode ser realizada por uma reação química entre os resíduos e aditivos solidificantes ou por processos mecânicos. Migração de contaminantes é geralmente limitada pela diminuição da área de superfície exposta à lixiviação ou por revestimento de resíduos com materiais de baixa permeabilidade (SPENCE e SHI, 2005).

A estabilização por solidificação em matrizes de cimento é uma tecnologia consolidada no tratamento de resíduos inorgânicos em países como Estados Unidos, Japão e França (LANGE et al., 1998).

BRITO (2007) considera que um material está estabilizado por solidificação quando ocorre uma redução da periculosidade, mobilidade e solubilidade dos seus contaminantes e há uma garantia de sua resistência à compressão e às variações de temperatura, obtendo-se melhoria da sua integridade/durabilidade. O autor também comenta que existem dois aspectos importantes para o entendimento da estabilização por solidificação. O primeiro está relacionado ao critério de imobilização dos contaminantes, que são aprisionados ou retidos na forma de um precipitado na superfície da matriz e/ou são incorporados em seu interior. O segundo aspecto está relacionado ao critério de integridade/durabilidade dos materiais, pois a

matriz estabilizada e solidificada aprisiona ou retém os contaminantes por meio de mecanismos físicos, ou seja, sem ocorrer necessariamente reações químicas.

2.4.2 Uso de Cimento Portland na Estabilização por Solidificação

O cimento Portland é um dos mais importantes materiais de construção e altamente empregado pela humanidade. Por definição, é um “*aglomerante hidráulico resultante da mistura homogênea de clínquer Portland, gesso e adições normalizados finamente moídos*”. Aglomerante porque tem a propriedade de unir outros materiais. Hidráulico porque reage (hidrata) ao se misturar com água e depois de endurecido ganha características de rocha artificial, mantendo suas propriedades, principalmente se permanecer imerso em água por aproximadamente sete dias. A combinação do cimento com materiais de diferentes naturezas como areia, pedra, cal, aditivo e outros, origina a formação das pastas, argamassas e concretos (MARTINS, 2008).

O cimento Portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Esses silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica (PETRUCCI, 1998).

Os componentes principais, cuja determinação é feita a partir de uma análise química, são: óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido de magnésio (MgO), óxidos (Na₂O e K₂O) e sulfatos (SO₃) (PETRUCCI, 1998).

i) CaO – Óxido de cálcio é o componente essencial dos cimentos, figurando numa porcentagem de 60 a 67%. Na maior parte provém da decomposição do carbonato de cálcio. Só em proporção muito pequena é que se encontra em estado de liberdade no cimento artificial. Em igualdade de condições, pode-se dizer que as propriedades mecânicas do Portland aumentam com o teor de cal desde que se encontre completamente combinado. Se o processo de fabricação não é perfeito, pode resultar certa quantidade de cal livre, cuja presença em estado anidro, acima de certos limites, prejudica a estabilidade de volume das argamassas e concreto;

ii) SiO₂ – A proporção de sílica no cimento Portland varia de 12 a 25%. Ela se encontra combinada com outros componentes e provém, sobretudo das argilas usadas como matéria

prima. É da sua combinação com a cal que resultam os compostos mais importantes do cimento Portland;

iii) Al_2O_3 – Também da argila provém a alumina do cimento artificial; seu teor varia geralmente de 3 a 8%. O composto formado pela combinação desse óxido com a cal acelera a pega do aglomerante e reduz sua resistência aos sulfatos, razão pela qual a quantidade presente deve ser pequena. Praticamente não se pode prescindir da alumina porque, na indústria, o desenvolvimento das reações que possibilitam a formação do clínquer.

iv) Fe_2O_3 – Esse óxido, trazido pela argila, aparece geralmente no cimento Portland em quantidades relativamente pequenas, 0,5 a 6%, combinado com outros óxidos presentes. O óxido de ferro, desde que em porcentagem não muito elevada, é útil pelo seu papel de fundente, desenvolvendo nesse sentido uma ação talvez mais energética do que a alumina. Acredita-se que os teores relativamente altos de alumina e óxidos de ferro possam facilitar a produção comercial de um cimento com porcentagem de cal suficientemente alta para converter toda a sílica em silicato tricálcio, sem que resulte cal livre em quantidade inconveniente;

v) SO_2 – tem sua origem principalmente no sulfato de cálcio adicionado corretamente ao cimento para regular sua pega, retardando-a. Geralmente, estabelece as especificações o teor máximo de 3% para SO_3 , considerando-se perigosa sua presença acima desse limite, em virtude da formação do sulfoaluminato. Uma boa parte do pequeno teor de enxofre contido nas matérias primas e no combustível desprende-se no forno com as poeiras;

vi) MgO – A magnésia no cimento provém do carbonato de magnésio presente no calcário, geralmente sob a forma de dolomita (CaCO_3 , MgO_3), ou, em pequena quantidade, na argila, o seu teor no cimento varia de 0,1 a 6,5%;

vii) K_2O – Na_2O – Esses óxidos se encontram com frequência no cimento Portland, teores de 0,5 a 1,3%, desenvolvendo papel de fundentes na cozedura e agindo como aceleradores da pega.

Na hidratação do cimento ocorre o seguinte com os compostos, listados abaixo:

i) Silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - \text{C}_3\text{S}$) – A hidratação começa dentro de poucas horas, desprende-se calor; o composto anidro vai passando para a solução, aparecendo cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, enquanto uma massa gelatinosa de silicato hidratado se forma em torno dos grãos originais (PETRUCCI, 1998). É o maior responsável pela resistência em todas as idades, especialmente até o fim do primeiro mês de cura (BAUER, 1995).

ii) Silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - \text{C}_2\text{S}$) – É atacado lentamente pela água; depois de semanas os cristais se recobrem de silicato hidratado. Forma-se também $\text{Ca}(\text{OH})_2$, porém em menor quantidade que na hidratação de C_3S . Adquire maior importância no processo de endurecimento em idades mais avançadas, sendo largamente responsável pelo ganho de resistência há um ano ou mais (BAUER, 1995).

iii) Aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}_3\text{A}$) – Reage rapidamente com a água e cristaliza em poucos minutos. Não se produz hidróxido, mas aluminato hidratado. O calor de hidratação é tanto que quase seca a massa. Também contribui para a resistência, especialmente no primeiro dia (BAUER, 1995).

iv) Ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{C}_4\text{AFe}$) – Reage menos rapidamente que o C_3A . Não libera calor e forma também um aluminato hidratado. Em nada contribui para a resistência (BAUER, 1995).

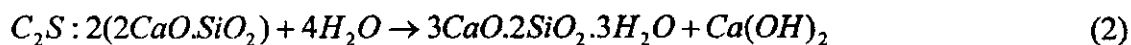
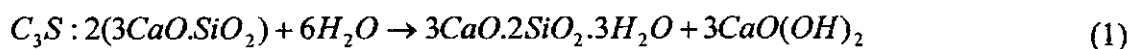
As propriedades químicas do cimento Portland estão diretamente ligadas ao processo de endurecimento por hidratação. Ainda não se conhecem com muita precisão as reações e os compostos envolvidos no processo de endurecimento, restando muitas questões a serem esclarecidas. O processo é complexo, admitindo-se, atualmente, que se desenrolem em desenvolvimentos que compreendem a dissolução na água, precipitações de cristais e gel com hidrólises e hidratações dos componentes do cimento (BAUER, 1995).

Inicialmente, o silicato tricálcico (C_3S) se hidrolisa, isto é, separa-se em silicato bicálcico C_2S e hidróxido de cal. Este último precipita como cristal da solução supersaturada de cal. A seguir, o silicato bicálcico existente, resulta da hidrólise, combina-se com a água no processo de hidratação, adquirindo duas moléculas de água e depositando-se, a temperaturas ordinárias, no estado de gel. Esse processo, quando conduzido em temperaturas elevadas,

resulta numa estrutura de natureza cristalina. Os dois últimos constituintes principais do cimento, o aluminato tricálcico e o ferro aluminato de cálcio, se hidratam, resultando, do primeiro, cristais de variado conteúdo de água e, do segundo, uma fase amorfa gelatinosa. Esse processo é realmente rápido no clínker simplesmente pulverizado. O aluminato tricálcico presente é, de um modo geral, considerado o responsável pelo início imediato do processo de endurecimento (BAUER, 1995).

No processo da estabilização por solidificação usando cimento, as reações de hidratação justificam o endurecimento da matriz, pois o aluminato tricálcico (C_3A) quando hidratado provoca o endurecimento da mistura (BRITO, 2007).

As reações envolvidas na hidratação de cimento foram previamente apresentadas em PINTO (2001). Os silicatos de cálcio hidratam-se formando o composto C-S-H e hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ pelas reações:



Sendo que a velocidade de reação do C_2S é mais lenta que a do C_3S . A hidratação do aluminato tricálcico ocorre pela adição de sulfato de cálcio. Essa reação forma aluminato de trissulfato de cálcio hidratado [$(C_3A.3CaSO_4).32H_2O$] praticamente insolúvel. O C_4AF reage com o [$Ca(OH)_2$ e H_2O].

O tempo de início de pega¹ ocorre quando a água é adicionada e começam-se as reações com o cimento, que dependendo do cimento utilizado, pode ser em menos de 30 minutos. Já o fim de pega², onde a pasta endurece formando um bloco rígido se dá entre 5 e 10 horas (TARTUCE et al., 1990).

Um fator importante é a relação água/cimento (a/c) utilizada. De acordo com o autor, relações abaixo de $f_{a/c} = 0,25$ (ex: em 100g de aglomerante, tenho 25 g de água) não contêm água suficiente para ativar toda a hidratação do cimento. Por outro lado, relações a/c acima de 0,35 aumentam a fluidez e aumenta os poros, trazendo como consequência maiores permeabilidades e menores resistências (SPENCE, 1992).

Tempo de pega: O fenômeno da pega do cimento compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, propriedades essencialmente físicas, conseqüente, entretanto, a um processo químico de hidratação. É um fenômeno artificialmente definido como o momento em que a pasta adquire certa consistência que a torna imprópria a um trabalho. O tempo de pega do cimento é determinado por ensaio de Vicat (BAUER, 1995).¹ Início de pega: o tempo que decorre desde a adição de água até o início das reações com os compostos de cimento (PETRUCCI, 1998).² Fim de pega: Situação em que a pasta cessa de ser deformável para pequenas cargas e se forma um bloco rígido (PETRUCCI, 1998).

O principal produto de hidratação, C-S-H, tem uma composição variável e a sua morfologia é dependente da razão Ca/Si, das condições de fixação e da razão água/material sólido. O processo de cimentação fixa a água livre, aumenta o pH e altera outras propriedades químicas da mistura, reduz a área superficial e aumenta a resistência. Todos estes mecanismos contribuem para a melhora nas qualidades do resíduo tratado (EPA, 1993).

O início da cimentação da mistura resíduo/agente ligante ocorre quando a água é adicionada. Uma vez que o pó de cimento entra em contato com a água, o aluminato tricálcico imediatamente hidrata, causando uma rápida fixação que produz uma estrutura rígida. Numa fixação ideal, a água hidrata os silicatos de cálcio e os aluminatos no cimento para formar silicato de cálcio hidratado. Fibras finas e densamente empacotadas de silicato surgem das partículas de cimento e se entrelaçam para endurecer a mistura aprisionando os materiais inertes e os grãos de cimento que não reagiram (CONNER, 1990).

A hidratação dos silicatos tricálcicos e dicálcicos resulta na formação de tobermorita e hidróxido de cálcio cristalino. Estes compostos contribuem para o desenvolvimento da resistência após a fixação inicial. A velocidade de fixação é controlada pela quantidade de gesso (sulfato de cálcio hidratado) adicionada ao cimento. Se o gesso estiver presente em quantidade suficiente o sulfato combina-se com o aluminato tricálcico para formar o sulfoaluminato de cálcio, o qual reveste as partículas de cimento e retarda as reações de hidratação (CONNER, 1990).

As vantagens do processo de estabilização por solidificação baseado em cimento Portland podem ser:

- i) Disponibilidade de encontrar facilmente os materiais;**
- ii) Baixo custo dos materiais e dos equipamentos de mistura;**
- iii) Uso de minerais de ocorrência natural como matéria prima para a matriz;**
- iv) Habilidade de formar uma barreira física forte sob condições adversas;**
- v) Flexibilidade na formatação das propriedades conforme a aplicação;**
- vi) Baixa variabilidade na composição;**
- vii) Reações de fixação e endurecimento razoavelmente bem conhecidas e alguns dados disponíveis sobre a imobilização de metais.**

As desvantagens do processo de estabilização por solidificação são as seguintes:

- i) A eficiência do processo é sensível a presença de algumas substâncias em concentrações altas;
- ii) Os resíduos processados apresentam porosidade que pode permitir a lixiviação dos contaminantes em casos de uma fixação ineficiente;
- iii) O volume do resíduo aumenta devido à adição do agente ligante;
- iv) Existe a necessidade de especialistas para que uma aplicação seja bem sucedida, embora o processo aparentemente pareça simples (CONNER, 1990).

2.5 ESTUDOS REALIZADOS NO PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO

PINTO et al. (2002) apresentaram uma proposta de tratamento e disposição final para o resíduo de curtume contendo cromo, que corresponde ao processo de estabilização por solidificação. O método consiste na mistura de cimento Portland composto tipo II comercial e água juntamente com o resíduo de forma que, obtém-se um bloco rígido com perigo reduzido de contaminação de solo e aquífero após ser disposto em aterro industrial. Os corpos de prova foram constituídos de cimento (C), água (A), bentonita sódica (B), argila organofílica (O) e resíduo (R). Alguns ensaios foram realizados para estudar o comportamento de cada componente adicionado ao cimento. Para analisar o desempenho mecânico da matriz solidificada formada, ensaiaram-se resistência à compressão após 28 dias de cura e porosidade (análise de absorção de água). Realizou-se também ensaio de lixiviação, através da análise da quantidade de cromo lixiviado, fator de suma importância no tratamento de resíduos perigosos.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão encontra-se na TAB. 1, para um tempo de 28 dias de cura.

TABELA 1 – Resultados obtidos para a resistência à compressão

Formulação	Resistência à compressão (MPa)
CA	33,2
CAB	37,0
CAO	31,6
CABO	35,7
CABOR	28,9
CAR	17,1

Fonte: PINTO et al. (2002)

Os resultados mostraram que a presença da bentonita sódica (B), provocou um aumento de 11,5% na resistência à compressão. A argila organofílica (O) reduziu em 4,8% comparado ao sistema cimento/água. O sistema contendo ambas as argilas aumentou sua resistência à compressão em 7,5%. Para a formulação contendo argila e o resíduo de cromo, houve uma diminuição da resistência à compressão em 16% aproximadamente. A formulação contendo cimento e resíduo apresentou uma redução na resistência à compressão em 48,8%.

A determinação da porosidade, representada pela absorção da água, em porcentagem, PINTO et al. (2002) obteve os resultados apresentados na TAB. 2.

TABELA 2 – Resultados encontrados para porosidade

Formulação	Absorção de água(%)
CA	29,8
CAB	28,6
CAO	29,9
CABO	28,1
CABOR	32,2
CAR	37,5

Fonte: PINTO et al. (2002)

Na TAB.2 nota-se que a adição do resíduo de cromo (R) no sistema, provoca um aumento em 14,6% de absorção de água, de acordo com o sistema cimento/bentonita sódica/argila organofílica (CABOR). A formulação contendo apenas o resíduo com cimento (CAR) aumentou, comparado ao mesmo sistema em 33,5% em termos de absorção de água. A argila bentonita (CAB) reduz em 3,5% com relação ao sistema contendo cimento (CA) apenas. O ensaio de lixiviação apresentou os seguintes resultados para quantidade de cromo lixiviado.

TABELA 3 – Quantidade de cromo lixiviado em cada sistema

Formulação	Cromo Lixiviado (ppm)
CAR	2,07
CABR	1,85
CAOR	1,47
CABOR	1,06

Fonte: PINTO et al. (2002)

Pela análise da TAB. 3 nota-se que no sistema contendo bentonita sódica (CABR) reduziu o lixiviado em 11% e o sistema com argila organofílica (CAOR), diminuiu em 30% de cromo lixiviado. A presença de ambas as argilas (CABOR) reduzem em 49% a quantidade

de cromo lixiviado do sistema, com relação ao desempenho de cada argila, chegando a 1,06 ppm.

Trabalho realizado por HEREK et al. (2005) estudaram o processo de solidificação por estabilização do lodo da indústria têxtil em material cerâmico, visando à fabricação de materiais que possam ser usados na construção civil, verificando os aspectos físicos (resistência à compressão e absorção de água) e químico (lixiviação). Inicialmente realizou-se a caracterização do material a ser utilizado na construção dos corpos de prova: lodo e argila. Confeccionaram-se blocos cerâmicos nas dosagens de 0%, 10% e 20% de lodo seco e 20% de lodo úmido em relação à argila, e realizaram-se os testes acima citados nos tempos de cura de 7, 14, 28 e 90 dias.

HEREK et al. (2005) avaliaram a resistência à compressão em função do tempo de cura, bem como da quantidade de lodo adicionada à massa cerâmica, tendo como referência o bloco cerâmico fabricado com 0% de lodo.

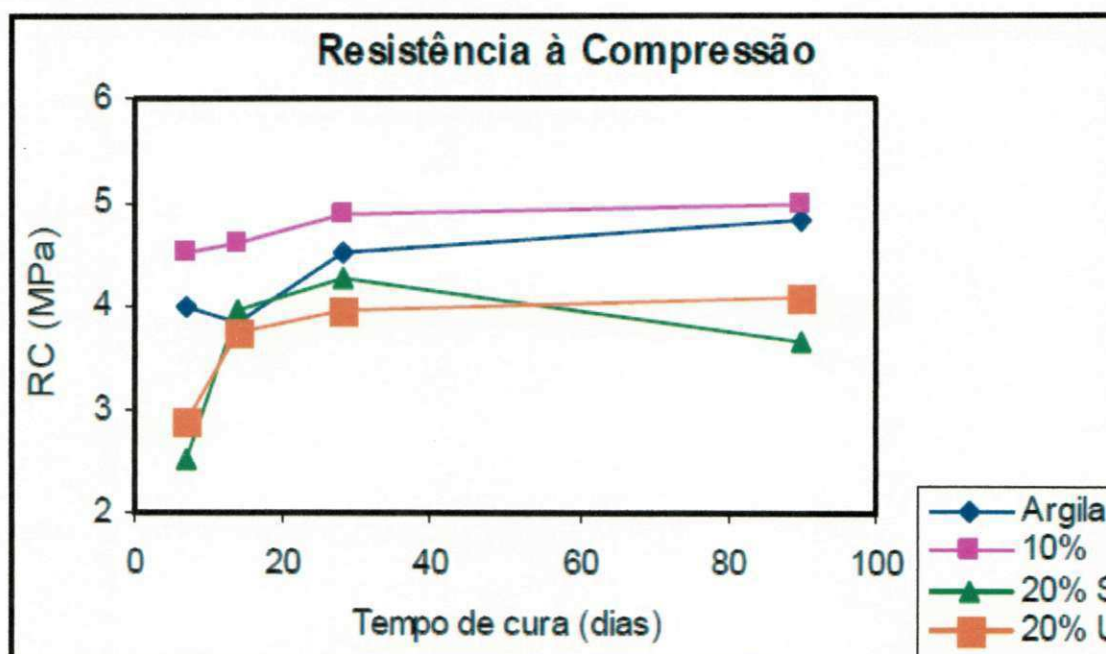


GRÁFICO 2 – Resistência à compressão versus tempo de cura.
Fonte: HEREK et al. (2005).

Verifica-se que o tempo de cura pouco influenciou na resistência à compressão dos blocos cerâmicos, com exceção daqueles corpos de prova fabricados com 20% de lodo. Este comportamento pode ser devido à maior quantidade de lodo incorporada à massa que também levou a uma maior absorção d'água (GRÁFICO 3). Verifica-se ainda que esta influência se deu de forma mais significativa para o tempo de cura de 28 e 90 dias. O aumento da quantidade de lodo adicionada à massa cerâmica levou a uma diminuição da resistência à

compressão do bloco cerâmico, tendo-se como referência o bloco cerâmico fabricado somente com argila. Deve-se ressaltar que, muito provavelmente, a presença de fibras têxteis no lodo deve ter contribuído para o aumento da resistência à compressão dos corpos de prova fabricados com 10% de lodo (menor quantidade de lodo, menor a resistência à compressão).

A absorção d'água foi avaliada em função da influência do tempo de cura e da adição de lodo à massa cerâmica (GRÁFICO 3).

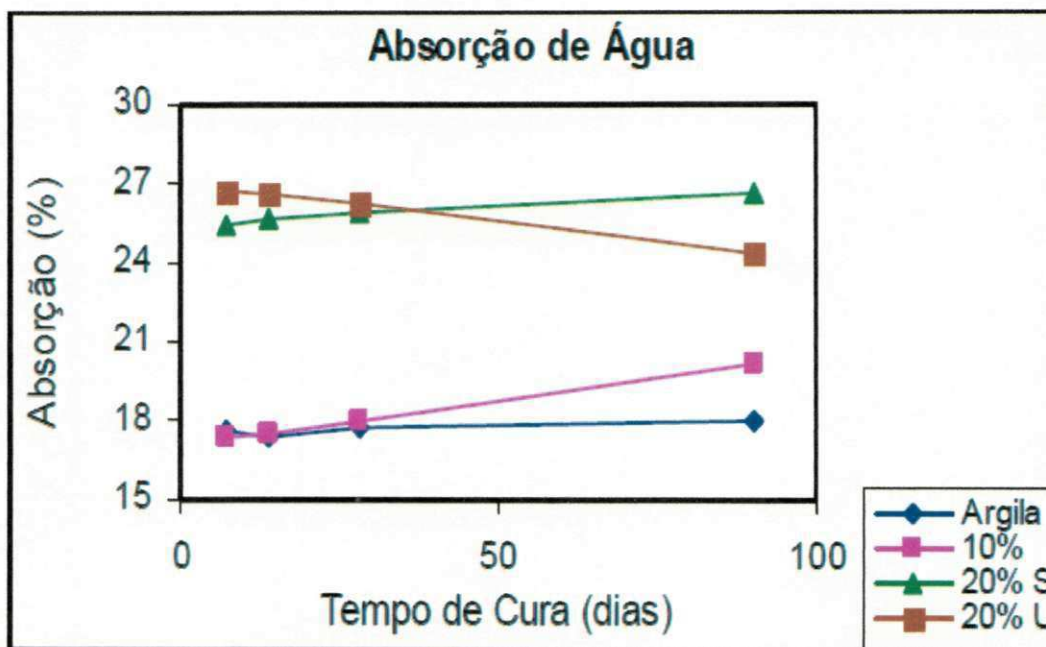


GRÁFICO 3 – CAA versus tempo de cura para 0%, 10% e 20% S e 20% U

S: seca; U: úmida

Fonte: HEREK et al. (2005)

Verifica-se que houve influência do tempo de cura no processo de absorção d'água, principalmente no tempo de cura de 90 dias. Observa-se ainda que esta influência foi mais significativa para os blocos cerâmicos fabricados a partir da mistura lodo/argila, provavelmente devido à higroscopicidade do lodo. É interessante ressaltar que o processo de absorção d'água foi diferente, quando se trabalhou com lodo seco e com lodo úmido, verifica-se que o processo se deu de forma inversa. Muito provavelmente a umidade do lodo deve ter influenciado neste processo, uma vez que a retração na queima foi muito maior nos blocos fabricados com lodo úmido, levando a uma maior absorção d'água no decorrer do processo de cura.

Na TAB. 4 estão apresentados os valores de metais pesados encontrados para os blocos cerâmicos preparados com 10 e 20% S (seco) e 20% U (úmido) de lodo em relação à argila e na TAB. 5 os valores de metais encontrados para os blocos cerâmicos fabricados somente com argila.

TABELA 4 – Teor de metais nos testes de lixiviação – blocos cerâmicos contendo lodo.

Metais	10%				20% S				20% U				NBR 10.004 mg.L ⁻¹
	7 dias	14 dias	28 dias	90 dias	7 dias	14 dias	28 dias	90 dias	7 dias	14 dias	28 dias	90 dias	
Se	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1
Ba	nd	nd	0,08	nd	0,11	nd	nd	Nd	0,12	0,12	nd	Nd	100
Cd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,5
Pb	0,01	nd	nd	nd	nd	0,07	nd	0,09	nd	nd	nd	0,10	*
Cr	0,03	0,02	nd	nd	nd	0,14	0,04	0,03	0,02	0,003	0,04	0,04	5
Cu	0,05	0,11	0,05	0,05	0,14	0,02	0,009	0,15	0,04	0,004	0,01	0,14	*
Ni	nd	nd	nd	nd	nd	0,06	0,30	0,01	nd	Nd	0,3	0,01	*
Zn	0,17	0,09	0,05	0,05	0,03	0,36	0,11	0,03	0,15	0,14	0,08	0,02	*
Fe	nd	nd	nd	nd	0,31	0,02	Nd	0,06	nd	nd	nd	0,06	*
Al	0,33	0,52	0,32	0,32	nd	nd	nd	nd	2,17	2,21	nd	nd	*

*Parâmetros não apresentados na norma NBR 10004; nd: não detectados.

Fonte: HEREK et al. (2005)

TABELA 5 – Metais analisados nos testes de lixiviação – blocos cerâmicos com argila pura.

Metais	Argila			
	7 dias	14 dias	28 dias	90 dias
Se	nd	nd	nd	nd
Ba	nd	nd	nd	nd
Cd	nd	nd	nd	nd
Pb	0,009	nd	nd	nd
Cr	0,01	0,01	nd	nd
Cu	0,04	0,009	0,009	0,05
Ni	nd	nd	nd	nd
Zn	0,11	0,005	0,001	0,01
Fe	nd	nd	nd	nd
Al	0,4	0,6	0,6	0,6

Fonte: HEREK et al. (2005)

Os resultados dos testes de lixiviação mostraram que o processo de estabilização por solidificação leva a uma excelente retenção dos metais avaliados. Nas TAB. 4 e 5 verificam-se que o tempo de cura não influenciou para os blocos cerâmicos fabricados com 0% e 10% de lodo, todos ficaram dentro do valor estabelecido pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Verifica-se ainda que, para os blocos fabricados com 20% de lodo o tempo de cura influencia no processo de retenção de metais para 28 e 90 dias. Analisando os blocos cerâmicos contendo 20% de lodo verificou-se que o teor dos metais cobre, chumbo e

alumínio, aumentou com o decorrer do tempo de cura de 28 dias para 90 dias. Os metais níquel e zinco tiveram uma boa retenção com o aumento do tempo de cura. O processo de estabilização por solidificação retém de forma significativa os metais níquel e zinco. Já o metal cromo se manteve estável com o passar do tempo de cura. Nenhum dos metais avaliados ultrapassou o valor máximo permitido pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Trabalho realizado por PIETROBON et al. (2004) apresentaram-se a caracterização físico-química do lodo têxtil de uma lavanderia industrial, para o estudo de sua disposição final. Nesta caracterização analisou-se: DQO, sólidos totais, fixos e voláteis no lodo, densidade, pH, e a presença de metais, sendo detectado a presença dos metais Fe, Mg, Al, Si, Ca, Cr, Co, Cu, Mn e Zn. Corpos de prova de lodo/cimento, nas dosagens de 10%, 20% e 30% de lodo em relação ao cimento, foram submetidos à análise de resistência a compressão, tempo de pega e testes de lixiviação por batelada. Os resultados demonstraram que na pasta de lodo/cimento, os valores de resistência mecânica aos 28 dias, atingem valores maiores que 10 MPa. A lixiviação ocorrida nas amostras de pasta sem a incorporação de lodo é da mesma ordem de grandeza que nas amostras que contém lodo. Isto nos permite concluir que a pasta permite uma segura incorporação dos metais contidos no lodo têxtil.

Na 1ª fase da moldagem dos corpos de prova de lodo e cimento, o cimento utilizado foi CII F32, enquanto que na 2ª fase foi o cimento CP II Z. As dosagens moldadas na 1ª fase foram: 0% (pasta de água/cimento) e 10%, 15% e 20% de lodo em relação ao cimento; na 2ª fase: 0%, 10%, 20% e 30% de lodo em relação ao cimento. Na 1ª fase foram moldados 13 corpos, distribuídos em: 1 para a idade de 3 dias (corpo nº 1), 3 para a idade de 7 dias (corpos nº 2, 3 e 4), 3 para a idade de 14 dias (corpos nº 5, 6 e 7), 3 para a idade de 28 dias (corpos nº 8, 9 e 10) e 3 para a idade de 90 dias (corpos nº 11, 12 e 13) (PIETROBON et al., 2004).

TABELA 6 – Resistência mecânica à compressão dos corpos de prova na 1ª fase da moldagem.

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)			
	Branco	10%	15%	20%
7	59,01	51,90	48,74	49,72
14	61,97	53,11	58,98	55,91
28	57,73	49,58	52,73	54,57
90	43,74	39,84	59,59	34,61

Fonte: PIETROBON et al. (2004)

Na 2ª fase da moldagem dos corpos de prova de lodo e cimento, o cimento utilizado foi o cimento CP II Z. As dosagens moldadas na 2ª fase: 0%, 10%, 20% e 30% de lodo em

relação ao cimento. Na 2ª fase foram moldados 6 corpos, distribuídos em: 2 para a idade de 7 dias (corpos nº 1 e 2), 2 para a idade de 14 dias (corpos nº 3 e 4) e 2 para a idade de 28 dias (corpos nº 5 e 6).

TABELA 7 – Resistência mecânica à compressão dos corpos de prova na 2ª fase da moldagem.

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)			
	Branco	10%	15%	20%
7	42,79	39,76	38,42	30,31
14	39,85	43,98	37,27	36,48
28	40,25	25,85	34,84	38,40
90	-	-	-	-

Fonte: PIETROBON et al. (2004)

Observa-se que a presença no lodo interfere na matriz estabilizada por solidificação, com o lodo interferindo negativamente na estrutura, mas não de forma crítica, pois as pastas contendo lodo apresentam resistência da mesma ordem de grandeza que o branco (pasta de água/cimento), para 7 e 14 dias, com uma pequena diferença de resistência para os 28 dias de cura.

A lixiviação ocorreu com a amostra contendo 30% de lodo em relação ao cimento na forma granular, em monoextrações, utilizando a água desmineralizada como solvente porque é mais simples, barato e de fácil obtenção em laboratório. Os resultados da lixiviação dos corpos de prova, com tratamento de 30% e 28 dias de cura.

TABELA 8 – Concentrações obtidas na lixiviação com 30% de lodo.

Elementos	Quant. Obtida (mg.L ⁻¹)	NBR 10.004 Anexo F Lixiviação
Alumínio	70,2	-
Cálcio	5639,0	-
Cobalto	5,46	-
Ferro	15,52	-
Magnésio	18,337	-
Sódio	65,896	-
Zinco	8,792	-

Fonte: PIETROBON et al. (2004)

Pelos resultados apresentados na TAB. 8, pode-se observar que nenhum dos elementos presentes no lixiviado dos corpos de prova de lodo/cimento na dosagem de 30% em relação ao cimento, consta da listagem da norma brasileira. Conforme a ABNT, estes materiais seriam

considerados inertes, pelo menos para os elementos analisados, mas é claro que para classificá-lo efetivamente seriam necessárias outras análises. Por outro lado, a quantidade de lodo têxtil gerada por dia nas lavanderias industriais é da ordem de 500 kg.dia^{-1} , ocasionando um excesso desses metais no solo, que mesmo não sendo tóxicos pela ABNT, poderiam vir a ser pela quantidade em excesso a ser depositada.

O trabalho realizado por BRITO e SOARES (2009), compararam as médias de quatro tratamentos (A, B, C e D) com 0, 40, 50 e 60% respectivamente. Cimento Portland comum, bentonita sódica e hidróxido de cálcio foram usados para estabilizar por solidificação o resíduo sólido sintético contendo óxido de Cd^{2+} , Pb^{2+} e Cu^{2+} . Concluiu que proporção do resíduo influenciou no resultado de lixiviação do cádmio, chumbo e cobre. Para os ensaios de integridade/durabilidade, ficou constatado que o aumento da absorção de água (aumento da porosidade) fez com que a resistência à compressão diminuísse. Com o uso de materiais hidráulicos (cimento, hidróxido de cálcio e bentonita) se mostrou ideal para retenção de metais pesados, evitando a sua lixiviação e a solubilização para o meio ambiente.

Na TAB 9, estão apresentados os resultados médios dos tratamentos A, B, C e D em função da avaliação dos materiais estabilizados e solidificados, em que a retenção dos contaminantes foi verificada por meio dos critérios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes. A concentração do material bruto para o RS em mg.kg^{-1} foi bastante elevada, indicando que ele continha significativo teor de contaminantes ($125,878 \text{ mg.kg}^{-1}$ para o cádmio; $92,875 \text{ mg.kg}^{-1}$ para o chumbo e $79,451 \text{ mg.kg}^{-1}$ para o cobre).

TABELA 9 – Resultados médios para os tratamentos A, B, C, D dos ensaios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes.

Critérios de Integridade/Durabilidade	A (0%)	B (40%)	C (50%)	D (60%)
Resistência à compressão (MPa) – antes da imersão em água	6,563	3,096	4,180	4,470
Resistência à compressão (MPa) – após imersão em água	1,380	0,681	0,919	0,983
Absorção de água (%)	37,061	50,061	36,852	38,583
Umidificação/secagem (%)	10,814	11,457	11,951	10,345
Critérios de imobilização dos contaminantes	A	B	C	D
Lixiviação I – Cd ⁺² (mg.kg ⁻¹)	ND	3,784 ¹ 6,3072	8,541 ¹ 11,387 ²	29,485 ¹ 32,814 ²
Lixiviação I – Pb ⁺² (mg.kg ⁻¹)	ND	4,9981 8,330 ²	14,885 ¹ 19,846 ²	26,748 ¹ 29,768 ²
Lixiviação I – Cu ⁺³ (mg.kg ⁻¹)	ND	8,321 ¹ 13,868 ²	15,850 ¹ 21,132 ²	22,090 ¹ 24,584 ²
Solubilização – Cd ⁺² (mg.kg ⁻¹)	ND	0,014 ¹ 0,058 ²	0,027 ¹ 0,093 ²	0,054 ¹ 0,1512
Solubilização – Pb ⁺² (mg.kg ⁻¹)	ND	0,300 ¹ 1,2522	0,600 ¹ 2,004 ²	1,000 ¹ 2,785 ²
Solubilização – Cu ⁺² (mg.kg ⁻¹)	ND	0,060 ¹ 0,250 ²	0,120 ¹ 0,401 ²	0,180 ¹ 0,501 ²
Lixiviação II – Cd ⁺² (mg.kg ⁻¹)	-	-	1,358 ¹ 2,142 ²	1,980 ¹ 3,785 ²
Lixiviação II – Pb ⁺² (mg.kg ⁻¹)	-	-	2,980 ¹ 3,928 ²	3,452 ¹ 7,871 ²
Lixiviação II – Cu ⁺² (mg.kg ⁻¹)	-	-	3,389 ¹ 5,859 ²	5,338 ¹ 11,842 ²

¹ valor considerando a diluição do resíduo no aglomerante; ² valor desconsiderando a diluição do resíduo no aglomerante; ND: não detectado (abaixo do limite de detecção da curva analítica do AAS: 0,010 mg.kg⁻¹ para o cádmio; 0,015 mg.kg⁻¹ para o chumbo e 0,010 mg.kg⁻¹ para o cobre).

Fonte: Brito (2009).

ROJAS et al. (2009) aplicaram a técnica de estabilização por solidificação em um solo contaminado com crescentes quantidades do resíduo industrial borra oleosa ácida (BOA), utilizando como agente encapsulante o cimento Portland CP-V ARI. Analisaram fisicamente o solo contaminado através de ensaios de resistência à compressão simples. As proporções utilizadas foram: 10 e 20% de cimento, tempo de cura de 7, 14 e 28 dias e percentagem de resíduo 0, 2, 4 e 6%. Obtiveram-se os melhores resultados, para uma percentagem de cimento de 20%, tempo de cura de 28 dias e percentagem de resíduo de 2%, com uma resistência média de 6,8 MPa. A partir do acréscimo do resíduo essa resistência diminuía para 2,92 MPa. Concluíram-se que o contaminante é o causador da principal influência nos resultados de resistência à compressão simples, que o teor de cimento aumenta a resistência do solo

contaminado e que o tempo de cura acarreta em um breve aumento de resistência. Os valores para a resistência à compressão encontram-se na TAB. 10

TABELA 10 – Resistência à compressão simples do solo/cimento/BOA.

		Cimento Portland					
		10%			20%		
		Tempo de Cura					
		7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Teor de contaminante	0%	2,57	3,75	4,56	6,80	6,37	8,78
		3,51	3,62	4,55	6,68	6,74	8,08
		3,87	3,96	4,51	6,74	9,01	8,85
	2%	3,24	2,92	4,69	5,06	5,37	6,20
		3,34	3,09	4,90	5,08	5,14	7,18
		3,28	3,07	5,15	5,10	5,43	7,03
	4%	1,72	1,77	2,98	3,34	3,45	4,09
		1,61	1,89	3,05	2,92	3,71	4,68
		1,81	1,83	2,76	3,44	3,36	4,37
	6%	1,16	1,41	1,86	2,13	2,05	2,77
		1,16	1,36	1,53	2,08	2,34	2,87
		0,94	1,35	1,34	2,11	2,08	3,12

Fonte: ROJAS et al. (2009)

PRIM et al. (2009) estudaram, em matrizes de cimento Portland simples, os efeitos de diferentes percentagens de lodo de indústria têxtil e o tempo de cura sobre a resistência à compressão de matrizes estabilizadas por solidificação. Foi adotado o delineamento experimental inteiramente ao acaso no esquema fatorial 5x3 com 03 repetições, sendo analisados cinco níveis do fator percentual de lodo (0, 10, 20,30 e 40%) e três níveis no fator tempo de cura (7,14 e 28 dias), estando apresentados na TAB. 11.

TABELA 11 – Resistência à compressão (MPa) para interação % lodo versus tempo de cura

% lodo	Tempo de Cura (dias)		
	7	14	28
0	44,57	44,27	48,14
10	31,58	41,27	36,36
20	19,72	39,57	31,45
30	5,27	20,72	34,00
40	0,93	6,00	14,67

Fonte: PRIM et al. (2009)

Os dados mostram que à medida que foi aumentando o percentual de lodo nos três períodos de cura, houve reduções da resistência à compressão. Com as dosagens de lodo utilizadas houve diferenças para 7, 14 e 28 dias de cura. Ficou constatado que o tempo de cura

de 28 dias apresentou maior resistência à compressão para os percentuais de lodo em comparação com 7 e 14 dias para 30% e 40% de lodo. Com relação ao percentual de lodo observa-se que a partir da dosagem de 20% de lodo o tempo de cura influenciou na resistência à compressão. O tempo de cura influenciou na resistência à compressão de matrizes estabilizadas por solidificação em matrizes de cimento. Pode-se afirmar com 99% de confiança a influência do tempo de cura sobre as características físico – mecânicas das matrizes estabilizadas por solidificação. Com o aumento do percentual de lodo têxtil foram obtidas reduções significativas na variável estudada.

GUIMARÃES (2008) utilizou o processo de estabilização por solidificação, o resíduo utilizado lodo primário e cimento (aglomerante), os fatores adotados foram: tempo de estabilização por solidificação (7, 14 e 28 dias) e porcentagem de lodo (5, 25 e 45%).

A TAB.12 mostra os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão (RC) realizada nos corpos de prova (CP), em que o melhor resultado foi para 28 dias e 5% de lodo.

TABELA 12 – Resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão

CP	Fator Tempo	Fator Percentagem	Resistência a Compressão (MPa)
A	7	5	1,9824
B	28	5	3,3205
C	7	45	0,6900
D	28	45	0,1982
E ₁	14	25	1,2886
E ₂	14	25	1,2885
E ₃	14	25	1,2887

Fonte: (GUIMARÃES, 2006)

A TAB.13 mostra os resultados obtidos para o ensaio de capacidade de absorção de água (CAA), em que a maior percentagem de absorção de água ocorreu para 7 dias e 45% de lodo, ou seja, maior percentual de lodo e menor tempo de estabilização por solidificação ocasiona maior absorção de água.

TABELA 13 – Resultados obtidos para a capacidade de absorção de água

CP	Fator Tempo	Fator Percentagem	Capacidade de Absorção de água (%)
A	7	5	20,7059
B	28	5	21,3021
C	7	45	29,3045
D	28	45	20,7800
E ₁	14	25	24,6526
E ₂	14	25	24,6525
E ₃	14	25	24,6527

Fonte: (GUIMARÃES, 2008)

A TAB. 14 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de umidificação/secagem (U/S), em que o melhor resultado foi para 28 dias e 5% de lodo.

TABELA 14 – Resultados obtidos para a umidificação/secagem

CP	Fator Tempo	Fator Percentagem	Umidificação/Secagem (%)
A	7	5	7,8779
B	28	5	2,5962
C	7	45	19,9426
D	28	45	4,0400
E ₁	14	25	7,3450
E ₂	14	25	7,3449
E ₃	14	25	7,3451

Fonte: (GUIMARÃES, 2008)

Os resultados apresentados na TAB. 14 indicam que uma quantidade elevada de lodo, 45%, e poucos dias ocasionam maior percentagem de umidificação/secagem no material estabilizado por soldificação.

A TAB. 15 mostra os resultados obtidos para o ensaio de lixiviação realizado nos corpos de prova (CP), em que o melhor resultado foi para 7 e 28 dias e 5 % de lodo.

TABELA 15 – Resultados obtidos para o ensaio de lixiviação – cromo

CP	Fator Tempo	Fator Percentagem	Lixiviação – Cromo (mg.kg ⁻¹)
A	7	5	558,28
B	28	5	568,84
C	7	45	3319,96
D	28	45	3951,40
E ₁	14	25	1579,82
E ₂	14	25	1589,82
E ₃	14	25	1597,81

Fonte: (GUIMARÃES, 2008)

Na TAB.16 estão apresentados os resultados para a solubilização dos metais pesados cromo, cádmio e cobre. Para o contaminante zinco a análise de espectrometria de absorção atômica mostrou que os valores ficaram abaixo do limite de detecção do aparelho de absorção atômica que era de 0,01 mg.L⁻¹.

TABELA 16 – Resultados obtidos para o ensaio de solubilização

CP	Fator tempo	Fator (%)	Solubilização (mg.kg ⁻¹)		
			Cromo	Cádmio	Cobre
A	7	5	2,72	4,00	8,56
B	28	5	5,27	1,04	4,24
C	7	45	25,20	0,68	35,06
D	28	45	17,58	1,76	4,91
E ₁	14	25	24,97	4,71	31,96
E ₂	14	25	25,97	4,79	32,04
E ₃	41	25	26,89	4,83	32,16

Fonte: (GUIMARÃES, 2008)

TABELA 17 – Eficiência de retenção do metal pesado cromo para lixiviação.

CP	Massa de aglomerante (g)	Massa de lodo (g)	Conc. do lixiviado tratado (mg.kg ⁻¹)	Conc. do lixiviado bruto (mg.kg ⁻¹)	Eficiência de retenção
A	304,01	16,00	558,28	4.461,63	86,83
B	285,00	15,02	568,84	4.461,63	86,58
C	165,01	135,01	3.319,96	4.461,63	-35,29
D	165,00	135,02	3.951,40	4.461,63	-61,04
E	225,00	75,01	1.589,82	4.461,63	52,49

Fonte: (GUIMARÃES, 2008)

A concentração de metais pesados no lixiviado do lodo bruto foi bastante elevada, ou seja, o resíduo apresentou alto teor de contaminantes: 4.461,63 mg.kg⁻¹ de cromo. Os valores corroboram com a norma de classificação de resíduos que considera lodo primário de curtume como Perigoso (Classe I). Analisando a eficiência de retenção calculada considerando as massas de lodo e aglomerante, a concentração no lixiviado dos corpos-de-prova A (7 dias e 5% de lodo), B (28 dias e 5% de lodo) e E (14 dias e 25% de lodo), apresentaram redução para o metal analisado cromo. A eficiência de retenção dos contaminantes calculada considerando as massas de lodo e aglomerante é sempre menor, quando comparada com a eficiência calculada não considerando as massas. Isto mostra a influência das massas do lodo e do aglomerante no processo de estabilização por solidificação. Os valores negativos indicam que não há eficiência no tratamento. As melhores eficiências são para os fatores: 28 dias de preparação e 5% de lodo primário, para o cromo. Enquanto que os piores resultados são para sete dias e 45% de lodo.

TABELA 18 – Eficiência de retenção do metal pesado cromo para solubilização.

CP	Massa de aglom. (g)	Massa de lodo (g)	Conc solub. trat. (mg.kg ⁻¹)	Conc solub. bruto (mg.kg ⁻¹)	Eficiência retenção ¹
A	304,01	16,00	2,72	33,52	91,46
B	285,00	15,02	5,27	33,52	83,45
C	165,01	135,01	5,27	33,52	-36,69
D	165,00	135,02	17,58	33,52	4,64
E	225,00	75,01	25,97	33,52	-3,30

Fonte: (GUIMARÃES, 2006)

Com relação à concentração de metais pesados no solubilizado, os corpos de prova A (7 dias e 5% de lodo), B (28 dias e 5% de lodo) e D (28 dias e 45% de lodo) obteve uma redução no metal analisado cromo.

Com a realização do trabalho, GUIMARÃES (2008) concluiu que o fator tempo e percentagem de lodo primário influenciaram na integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes. O melhor resultado foi para baixa quantidade de lodo e maior tempo de cura do material final, ou seja, 2,5 e 5% de lodo e 28 dias, que representaram, respectivamente, 97,79% e 86,58% de eficiência de redução de cromo. A integridade/durabilidade do material depende de forma significativa do percentual de lodo usado nas composições (quanto menor o percentual de lodo maior a integridade/durabilidade do material). Os corpos de prova A (7 dias e 5% de lodo), B (28 dias e 5% de lodo) e E (14 dias e 25% de lodo) foram avaliados como materiais solidificados com restrição, devido à sua não aprovação nos ensaios de lixiviação e solubilização, e com relação aos corpos de prova C (7 dias e 45% de lodo) e D (28 dias e 45% de lodo) ocorreu ineficácia do processo de tratamento, devido aos materiais não terem sido aprovados nos dois critérios de avaliação.

Capítulo 3

3 MATERIAIS E MÉTODO

O trabalho foi realizado no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduo (LABGER), pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ), localizada na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), no Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), da cidade de Campina Grande, no Estado da Paraíba – PB, Brasil.

Na primeira parte da pesquisa foi produzido o resíduo sólido sintético (RSS). O material foi classificado através do ensaio de lixiviação como perigoso (Classe I).

Na segunda parte da pesquisa foram realizados: 1) planejamento experimental e análise estatística; 2) preparação dos corpos de prova e 3) avaliação dos corpos de prova, através dos ensaios de integridade/durabilidade (resistência à compressão, umidificação/secagem e capacidade de absorção de água) e imobilização dos contaminantes (lixiviação e solubilização); 4) eficiência de retenção do cromo.

Na terceira parte foi utilizado o Protocolo de Avaliação do material estabilizado por solidificação e determinada a rota de destino desse material.

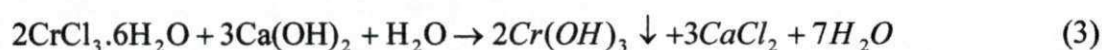
Os materiais usados na pesquisa foram os seguintes:

- ✓ Aglomerantes (Cimento CP II F32 e Hidróxido de Cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$);
- ✓ Cloreto de Cromo Hexahidratado - $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (PM: 266,45 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$);
- ✓ Ácido Acético Glacial – CH_3COOH (PM: 60,05 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$);
- ✓ Hidróxido de Sódio – NaOH 1,0 N;
- ✓ Ácido Clorídrico – HCl 1 N;
- ✓ Vidrarias (becker, proveta, bastão de vidro, vidro relógio);
- ✓ Agitador Magnético;
- ✓ pHmetro Digital;
- ✓ Balança Analítica;
- ✓ Estufa;
- ✓ Aparelho de Lixiviação de Frascos;
- ✓ Destilador;
- ✓ Aparelho de Resistência a Compressão

3.1 PREPARAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO SINTÉTICO (RSS)

A preparação do RSS foi produzido de acordo com as recomendações de MINOCHA et al. (2003). Para a produção do RSS contendo cromo, foi utilizado o sal de cloreto de cromo- $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ hexahidratado, e o aglomerante hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Esses materiais foram misturados e, adicionado 1 litro de água destilada. Após a adição, formou-se um precipitado que foi filtrado em papel de filtro. O resíduo contido no papel de filtro foi seco a temperatura ambiente, obtendo-se o RSS (bruto).

A reação de obtenção do RSS está apresentada na expressão (3)



A FIG. 2 mostra o RSS que foi produzido contendo cromo, após a mistura do cloreto de cromo e hidróxido de cálcio.



FIGURA 2 – Resíduo sólido sintético

3.2 CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO SINTÉTICO (RSS)

O teor de metais pesados presente no RSS foi determinado usando o aparelho de Espectrometria de Absorção Atômica (AAS). A análise foi realizada no laboratório pertencente à FUMMINERAL – Fundo de Apoio a Mineração, localizado em Goiás – GO. O RSS foi classificado conforme o procedimento descrito pela NBR 10.004 (ABNT, 2004),

usado para obtenção de extrato lixiviado de resíduo sólido. Esse ensaio classifica o resíduo sólido em perigoso (Classe I) ou não perigoso (Classe II).

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

3.3.1 Planejamento Experimental

Neste trabalho foi realizado o planejamento fatorial¹, visando analisar os efeitos de dois fatores: porcentagem (%) de resíduo sólido sintético e tempo (dias). O experimento terá como objetivo verificar se existe efeitos significativos entre a porcentagem (%) de resíduo sólido sintético e tempo (dias), além das interações entre esses fatores, através da análise de variância – ANOVA² utilizando o software Minitab 15.0 (MINITAB, 2006).

Foi adotado um fatorial 2² com três (3) pontos centrais. Os fatores adotados foram tempo de estabilização por solidificação (1, 4 e 7 dias) e porcentagem de resíduo sólido sintético (5, 12,5 e 20%). A partir do planejamento, foi possível identificar as melhores respostas dos fatores, para em seguida realizar a otimização do processo de estabilização por solidificação.

A matriz de entrada de dados e os sinais para os efeitos dos fatores estão apresentados na TAB. 19, totalizando (7) experimentos, denominados A, B, C, D, E₁, E₂ e E₃. A partir do planejamento, foi possível encontrar o modelo, efeitos ou coeficientes para as variáveis respostas (VR).

TABELA 19 – Matriz de entrada dos dados do experimento no Minitab 15.0

Experimento	Fator Tempo (t)	Fator Porcentagem (%)	Interação t x p	Nível do Fator Tempo	Nível do Fator Porcentagem	Variável Resposta (VR)
A	-1	-1	+	14	10	Y ₁
B	+1	-1	-	28	10	Y ₂
C	-1	+1	-	14	20	Y ₃
D	+1	+1	+	28	20	Y ₄
E ₁	0	0	0	4	12,5	Y ₅
E ₂	0	0	0	4	12,5	Y ₆
E ₃	0	0	0	4	12,5	Y ₇

¹Um projeto experimental é dito fatorial quando cada nível de um fator é ensaiado com todos os níveis dos outros fatores, sem restrições (BARBETTA *et al.* 2004).

²Análise univariada de variância (ANOVA): técnica estatística para determinar, com base em uma medida dependente, se várias amostras são oriundas de populações com médias iguais (HAIR *et al.* 2005).

No planejamento 2^2 foram adotados dois fatores: tempo (t) e percentagem (p) com seus respectivos níveis, baixo (-) e alto (+). A adição de três pontos centrais (0) permite uma estimativa independente do erro a ser obtido, não repercutem nas estimativas usuais dos efeitos em um planejamento fatorial 2^2 (MONTGOMERY e RUNGER, 2003). Outra razão para usar $2^2 + 3$ pontos centrais é a suposição (incerteza) de linearidade nos efeitos dos fatores, quando se usa apenas 2^2 . Não existindo a curvatura, os pontos centrais estarão no (ou próximo do) plano passando através dos pontos fatoriais. Se houver curvatura os pontos centrais não estarão no plano, não passando através dos pontos fatoriais.

3.3.2 Análise Estatística dos Dados

Para verificar se existem efeitos significativos entre as respostas médias dos tratamentos será realizada a Análise de Variância (*Analysis of Variance* - ANOVA). O procedimento será utilizado para inferir se tais efeitos realmente existem, a determinado nível de confiança (MONTGOMERY e RUNGER, 2003; MONTGOMERY, 1996).

Neste caso, a idéia é realizar a decomposição da variação, ou seja, das variâncias em: variação atribuída às diferenças entre as unidades experimentais (quadrado médio do resíduo - Q_{MR}) e variação atribuída às diferenças entre as unidades experimentais e atribuída às diferenças causadas pelos tratamentos ou fatores (quadrado médio dos tratamentos - Q_{MTrat}).

O teste baseia-se em duas hipóteses:

- i) H_0 : Não existe efeito principal dos fatores e interações entre ambos (tempo e percentagem de resíduo), as médias são iguais;
- ii) H_a : Existe pelo menos um efeito principal dos fatores e interações entre ambos (tempo e percentagem de resíduo), as médias são diferentes.

A primeira hipótese H_0 , também chamada de hipótese de nulidade, admite que não exista nenhum efeito principal dos fatores envolvidos. Já a segunda hipótese, H_a , também chamada de hipótese alternativa, admite que exista no mínimo um efeito principal dos fatores envolvidos (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

3.3.2.1 Valor de P e Análise de Variância (ANOVA)

Foi realizada a Análise de Variância, para decidir com certo nível de confiança, se os efeitos são ou não são significativamente diferentes entre si, além da sua interação e

curvatura. A análise de variância do experimento obedece ao seguinte esquema básico, mostrado no TAB. 20.

TABELA 20 – Análise de Variância (ANOVA) para dois fatores e três pontos centrais

Fontes de Variação	G.L	Soma Quadrática (SQ)	Quadrado Médio Ajustado (QM)	Valor ¹ P ²
Efeito principal	2	SQ _{Ef. principal}	QMA _{Ef. principal}	-
Interação t x p	1	SQ _{interação t x p}	QMA _{interação t x p}	-
Curvatura	1	SQ _{curvatura}	QM _{curvatura}	-
Erro Residual	2	SQ _{erro residual}	QMA _{erro residual}	-
Erro Puro	2	SQ _{erro puro}	QMA _{erro puro}	-
Total	6	SQ _{total}	-	-
R^2	R^2_{max}	R		

¹Efeito Significativo ($p \leq 0,05$); ²Efeito Não Significativo ($p > 0,05$); G.L: Graus de liberdade; t: Tempo; P: Percentagem; R^2 : Coeficiente de Determinação; R: Coeficiente de Correlação.

Fonte: MONTGOMERY e RUNGER (2003); MINITAB (2006).

A TAB. 20 mostra também que pode-se encontrar um Valor P¹ para a estatística de teste, conforme critério de decisão:

- i) Se $p \leq 0,05$ há significância do efeito principal, interação e curvatura ao nível de 5% de probabilidade;
- ii) Se $p > 0,05$, não há significância do efeito principal, interação e curvatura ao nível de 5% de probabilidade.

O coeficiente de determinação foi calculado usando a expressão (4):

$$R^2 = \frac{SQ_{\text{efeito principal}}}{SQ_{\text{total}}} \quad (4)$$

Enquanto que a porcentagem máxima de variação explicável foi calculada usando a expressão (5):

$$R^2_{\text{máx}} = \frac{SQ_{\text{total}} - SQ_{\text{puro.erro}}}{SQ_{\text{total}}} \quad (5)$$

¹Valor P ou probabilidade de significância: é definido como o menor nível de significância que conduz à rejeição da hipótese nula H_0 com os dados fornecidos (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

O coeficiente de correlação entre as variáveis foi calculado na expressão (6):

$$R = \sqrt{R^2} \quad (6)$$

Onde:

- R^2 : representa a variação explicável pelo modelo, não deve comparar com 100%, devido o erro puro;
- R^2 máximo: Quanto mais próximo de 100% melhor será a explicação do modelo, este valor deve ser comparado com o R^2 .
- R: O coeficiente de correlação.
 - R = 1 → Perfeita
 - R = 0,75 → Forte
 - R = 0,5 e < 0,75 → Média
 - R < 0,5 → Fraca
 - R = 0 → Inexistente

3.3.2.2 Modelo: Fatorial 2^2 com Ponto Central

A modelagem normalmente é realizada ajustando-se modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais obtidos a partir de planejamento fatorial (MONTGOMERY, 1996). No planejamento fatorial 2^2 com 3 pontos centrais o modelo que poderá ser adotado é o apresentado na expressão (7) admitindo-se que as superfícies apresentem significância de todos os coeficientes e de suas respectivas interações.

$$VR = \beta_0 + \beta_1 \times \text{tempo} + \beta_2 \times \text{perc} + \beta_3 \times \text{tempo} \times \text{perc} + \beta_4 \times \text{CtPc}^2 + e \quad (7)$$

Onde, β_1 , β_2 , β_3 , β_4 e β_5 são as estimativas dos parâmetros do modelo enquanto que tempo e porcentagem (perc) de resíduo sólido representam os fatores adotados. Logo:

VR: Variável resposta;

β_0 : Média geral modelo;

β_1 : Coeficiente do modelo referente a porcentagem;

β_2 : Coeficiente do modelo referente a porcentagem ao quadrado;

β_3 : Coeficiente do modelo referente ao tempo de estabilização por solidificação;

β_4 : Coeficiente do modelo referente ao tempo de estabilização por solidificação ao quadrado;

β_5 : Coeficiente do modelo referente à interação a porcentagem e ao tempo;

e: Erro.

3.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (CP)

A TAB. 21 mostra detalhadamente as quantidades de materiais que foram utilizados para a confecção dos corpos de prova. Porcentagem de resíduo, a massa de aglomerante e a massa de resíduo sólido sintético utilizado em função da quantidade de aglomerante, o volume de água, o início da hidratação após a adição de água, a massa total de cada corpo de prova, massa após o período de 24 horas (depois de ser retirados dos moldes) e a massa dos corpos de prova após o tempo de cura esperado.

TABELA 21 – Quantidades de RSS, aglomerante e água utilizados para confecção dos CP

Corpos de prova A										
Nº CP	Cod CP	% RSS	Massa RSS (g)	Massa Aglom (g)	Massa água (ml)	Idade CP (dias)	Início da Hidratação	Massa total (g)	Massa total após 24 horas (g)	Massa total prática após idade dos CP (g)
1	A ₁	5	16,5	330	89	1	15:27	435,5	403,4	390,8
2	A ₂	5	16,5	330	89	1	15:43	435,5	402,6	390,0
3	A ₃	5	16,5	330	89	1	16:01	435,5	402,0	389,4
Corpos de prova B										
1	B ₁	5	16,5	330	89	7	18:10	435,5	403,0	387,3
2	B ₂	5	16,5	330	89	7	18:23	435,5	401,7	387,2
3	B ₃	5	16,5	330	89	7	18:36	435,5	412,6	396,5
Corpos de prova C										
1	C ₁	20	58,0	290	81	1	16:33	429	397,2	379,8
2	C ₂	20	58,0	290	81	1	16:52	429	397,3	380,3
3	C ₃	20	58,0	290	81	1	17:12	429	398,1	383,0
Corpos de prova D										
1	D ₁	20	58,0	290	81	7	17:26	429	403,3	380,6
2	D ₂	20	58,0	290	81	7	17:43	429	402,3	379,9
3	D ₃	20	58,0	290	81	7	17:58	429	408,0	386,2
Corpos de prova E										
1	E ₁	12,5	38,75	310	90	4	14:17	438,75	393,2	382,3
2	E ₂	12,5	38,75	310	90	4	14:33	438,75	391,5	383,5
3	E ₃	12,5	38,75	310	90	4	14:45	438,75	392,7	382,3
4	E ₄	12,5	38,75	310	90	4	15:02	438,75	398,0	389,3
5	E ₅	12,5	38,75	310	90	4	15:19	438,75	394,0	389,2
6	E ₆	12,5	38,75	310	90	4	15:34	438,75	386,5	377,2
7	E ₇	12,5	38,75	310	90	4	15:50	438,75	387,8	374,9
8	E ₈	12,5	38,75	310	90	4	16:06	438,75	389,6	379,4
9	E ₉	12,5	38,75	310	90	4	16:23	438,75	392,5	380,3

Os corpos de prova foram preparados utilizando-se o cimento CII F32 (aglomerante) e RSS (contaminante), apresentados na FIG. 3.

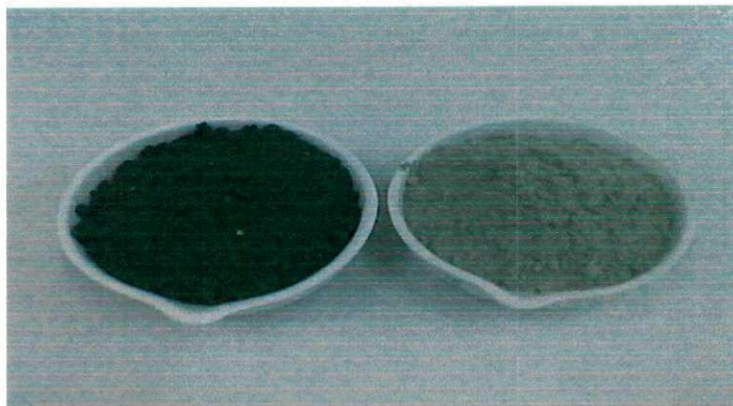


FIGURA 3 – Aglomerante e contaminante utilizados na preparação dos corpos de prova

Na preparação dos corpos de prova, foram considerados os aspectos proposto por BRITO (2007) e que estão estabelecidos no Protocolo de Avaliação de Materiais Estabilizados por Solidificação. Estes aspectos estão relacionados com as condições básicas para a realização dos ensaios em laboratório, conforme QUADRO 1.

QUADRO 1 – Aspectos operacionais com seus respectivos parâmetros.

Aspectos Operacionais	Parâmetros
Tempo de preparação das amostras	1, 4, 7, 14 ¹ e 28 dias ²
Formato do molde	Cilíndrico ²
Dimensão do molde	5 cm de diâmetro e 10 cm de altura ²
Tempo de moldagem	24 horas ²
Umidade relativa do laboratório	entre 50 a 100 % ²
Temperatura do laboratório	24 ± 4 °C ²

¹adaptado por BRITO (2007): Redução de tempo de 28 para 1, 4, 7 dias; ² NBR 7215 (ABNT, 1996).
Fonte: BRITO (2007)

Os corpos de prova foram preparados seguindo as seguintes etapas (BRITO, 2007):

- Inicialmente, o aglomerante (argamassa) foi pesado, utilizando-se uma balança analítica com precisão de 0,01 g;
- O resíduo sólido sintético (contaminante) também foi pesado separadamente, utilizando-se a mesma balança;
- O aglomerante e o contaminante foram bem misturados e, em seguida, postos em contato com a água. A partir do contato da mistura com água iniciou-se a contagem do tempo de preparação dos corpos de prova;
- Em seguida a mistura foi homogeneizada em presença de água, de forma que se obteve uma massa homogênea;
- O interior do molde foi lubrificado com óleo mineral, para facilitar o desmolde dos corpos de prova;
- A mistura foi colocada aos poucos no interior do molde, tendo-se o cuidado de comprimir bem, para evitar a formação de vazios nos corpos de prova;
- Uma placa de vidro de 70 mm por 70 mm de aresta e de 5 mm de espessura, também lubrificada com óleo mineral, foi colocada na superfície do molde, para evitar perda de água;
- O material ficou em repouso por um período de 24 horas para endurecimento da pasta. Após este período, os corpos de prova foram retirados dos moldes e deixados por um período de 1, 4 e 7 dias de preparação da amostra, para finalmente serem realizados os ensaios referentes aos critérios de avaliação de materiais, propostos no Protocolo;
- Durante a confecção dos corpos-de-prova, a temperatura ambiente e a umidade relativa foram registradas e encontravam-se com valores dentro da faixa estabelecida no Protocolo.

A FIG. 4 (a) mostra o molde cilíndrico com a placa de vidro utilizada e alguns dos corpos de prova preparados na FIG. 4 (b).

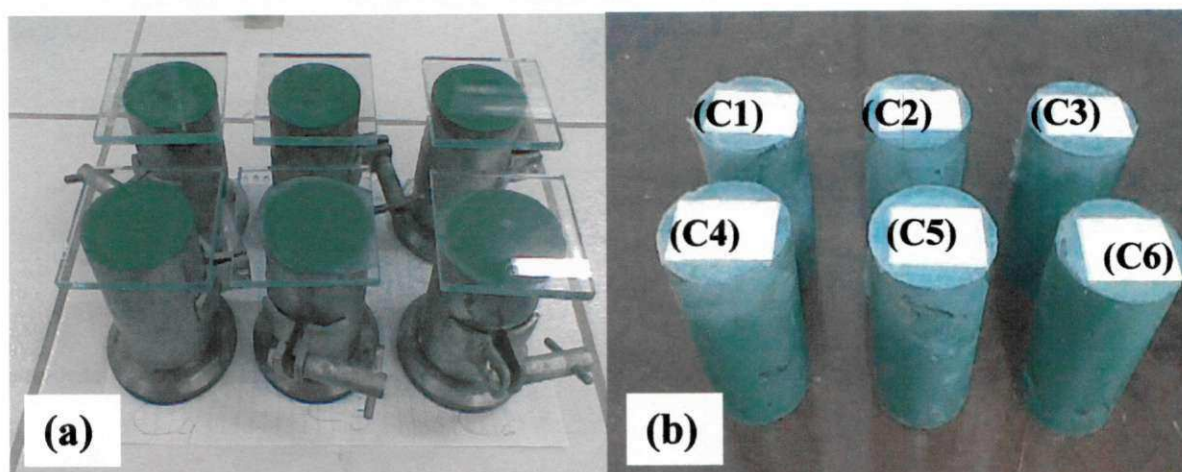


FIGURA 4 – Molde cilíndrico utilizado e corpos de prova preparados

3.5 AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS ATRAVÉS DO PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO POR SOLIDIFICAÇÃO

Os materiais E/S foram avaliados por meio de ensaios de integridade/durabilidade e por ensaios relacionados com a imobilização dos contaminantes, aplicando o Protocolo de Avaliação de Materiais estabilizado por solidificação. O protocolo avalia materiais estabilizados por solidificação sob ponto de vista ambiental, em consonância com a legislação brasileira para extrato lixiviado/solubilizado (BRITO, 2007).

3.5.1 Ensaios de Integridade/Durabilidade

Os ensaios de integridade/durabilidade foram realizados através da Resistência a Compressão (RC), Umidificação/Secagem (U/S) e Capacidade de Absorção de Água (CAA).

O ensaio de **Resistência à Compressão (RC)** foi realizado no laboratório de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), segundo a norma NBR 7215 (ABNT, 1996). Este ensaio foi utilizado para verificar a capacidade que o corpo de prova tende a resistir a uma determinada carga de compressão mecânica.

As FIG. 5 (a) mostra o aparelho utilizado para realizar a análise de resistência à compressão dos corpos de prova. O aparelho é da marca SOLOTEST, suporta uma carga de 5.000 kgf. O corpo de prova é submetido a uma carga mecânica de compressão, e a partir da leitura no aparelho, foi determinado essa resistência em MPa FIG. 5 (b).

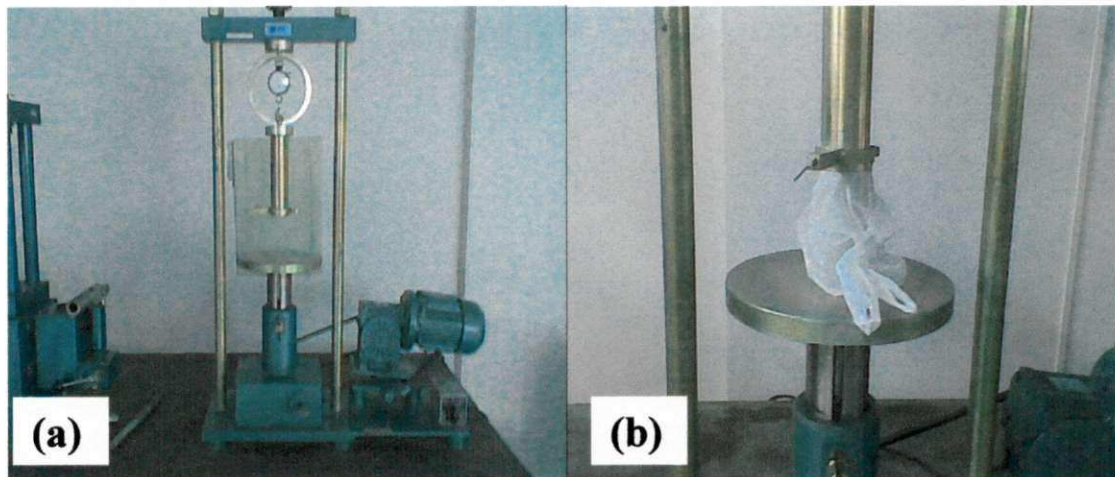


FIGURA 5 – Equipamento usado para análise resistência compressão dos CP

A expressão (8) mostra o cálculo para a resistência à compressão (RC):

$$RC \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^{-2}\text{)} = \frac{C \text{ arg } axK}{\text{Área}} \quad (8)$$

Onde:

RC: Resistência à compressão em MPa;

Carga: Carga de ruptura dos corpos de prova em (div);

Área: Área de seção dos corpos de provas em cm^2 ;

K : constante de correção do aparelho. igual a 2,18555 kgf/div;

Equivalência: $1 \text{ kgf/cm}^2 = 0,0980665 \text{ MPa}$

O ensaio de **Umidificação/Secagem (U/S)** foi realizado com base na Norma Wastewater Technology Center – WTC (1991). O ensaio consiste em simular e avaliar o material, em relação à sua capacidade em resistir às variações de mudanças de estado, ou seja, umidificação do material com água a $22 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ e secagem a $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, visando avaliar a durabilidade ao longo prazo e a perda de massa após sucessivos períodos de U/S. Neste caso, a amostra é umidificada com água e posteriormente submetida à secagem.

A expressão (9) mostra o cálculo para Umidificação/Secagem (U/S):

$$\% \text{Perda ...de...Peso} = \frac{\text{Pamostra ..natural} - \text{Pamostra ...ciclo..i}}{\text{Pamostra ...natural}} \times 100 \quad (9)$$

O ensaio de **Capacidade de Absorção de Água (CAA)** foi realizado usando a Norma NBR 9778 (ABNT, 2005), essa Norma caracteriza a porosidade aparente do corpo de prova.

A expressão (10) mostra o cálculo para (CAA):

$$CAA = \frac{MSAT - MS}{MS} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

$M_{SAT \text{ água}}$: massa do corpo de prova após saturação em água e fervura;

$M_{Seco 105 C}$: massa do corpo de prova seco em estufa.

3.5.2 Imobilização dos Contaminantes

Para a avaliação da imobilização dos contaminantes, foram empregados os ensaios de lixiviação e solubilização propostos respectivamente pelas normas NBR 10.005 (ABNT, 2004) e NBR 10.006 (ABNT, 2004), respectivamente.

Para o ensaio de lixiviação, uma amostra representativa de 100g (base seca) foi colocada em frasco de 2 litros com água destilada, deionizada e isenta de matéria orgânica mais solução lixiviante (ácido acético glacial e água). Em seguida a solução foi submetida à agitação, em equipamento rotativo com 30 rotações por minuto, relação líquido-sólido (L/S) igual à 20:1 e tempo de contato com o meio lixiviante igual a 18 ± 2 horas.

A FIG. 6 mostra a vista frontal do aparelho rotativo de frasco utilizado no experimento.



FIGURA 6 – Aparelho Rotativo de Frascos para Lixiviação

O teste de **solubilização** adotado é descrito pela norma NBR 10.006 (ABNT, 2004). Ele se caracteriza por usar amostra triturada, numa relação L/S igual a 4:1 e repouso por sete dias a temperatura ambiente. No ensaio, uma amostra representativa de 250 g (base seca) do material foi colocada em frasco de 1.500 mL. Em seguida foi adicionado 1.000 mL de água, destilada e isenta de orgânicos. Os metais foram quantificados após repouso por 7 dias, em temperatura de 250C. Foi utilizada a técnica de Espectrometria de Absorção Atômica (AAS) para determinar a concentração dos contaminantes.

Observações:

1 - A concentração do lixiviado e do solubilizado em mg.kg^{-1} , foram obtidas após a determinação do contaminante em mg.L^{-1} e a sua relação com: a massa da amostra e o volume da solução lixivante usada no ensaio de lixiviação e solução solubilizante usada no ensaio de solubilização em kg.L^{-1} . A massa da amostra (g da amostra) é aquela do ensaio de lixiviação (0,1 kg) ou do ensaio de solubilização (0,250 kg).

2 - Exemplo: $[\text{mg.kg}^{-1}] = \text{mg.L}^{-1} \times \text{L.kg}^{-1}$.

3.5.3 Cálculo da eficiência de retenção dos contaminantes

A retenção dos contaminantes pode ser determinada em função das massas e concentrações dos resíduos e aglomerantes conforme a expressão (11):

$$\left[X_{\text{Eficiência de Retenção}(\%)} \right] = \left[1 - \left(1 + \frac{RS}{Aglom} \right) x \left(\frac{[Y] \text{ Tratado}}{[Z] \text{ Bruto}} \right) \right] x 100 \quad (11)$$

O uso da expressão 11 teve o objetivo de avaliar e comparar se as massas dos agentes influenciavam na eficiência de retenção dos contaminante (BRITO, 2007).

Onde:

[x]: Eficiência de retenção (%);

RS: Massa do resíduo sintético ou contaminante (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}).

3.5.4. Aplicação do Protocolo de Avaliação

Os materiais foram avaliados utilizando-se o Protocolo de Avaliação de Materiais estabilizado por solidificação, que compreende 3 seções, podendo ser visto na FIG 7:

i) Seção 1: Aspectos operacionais;

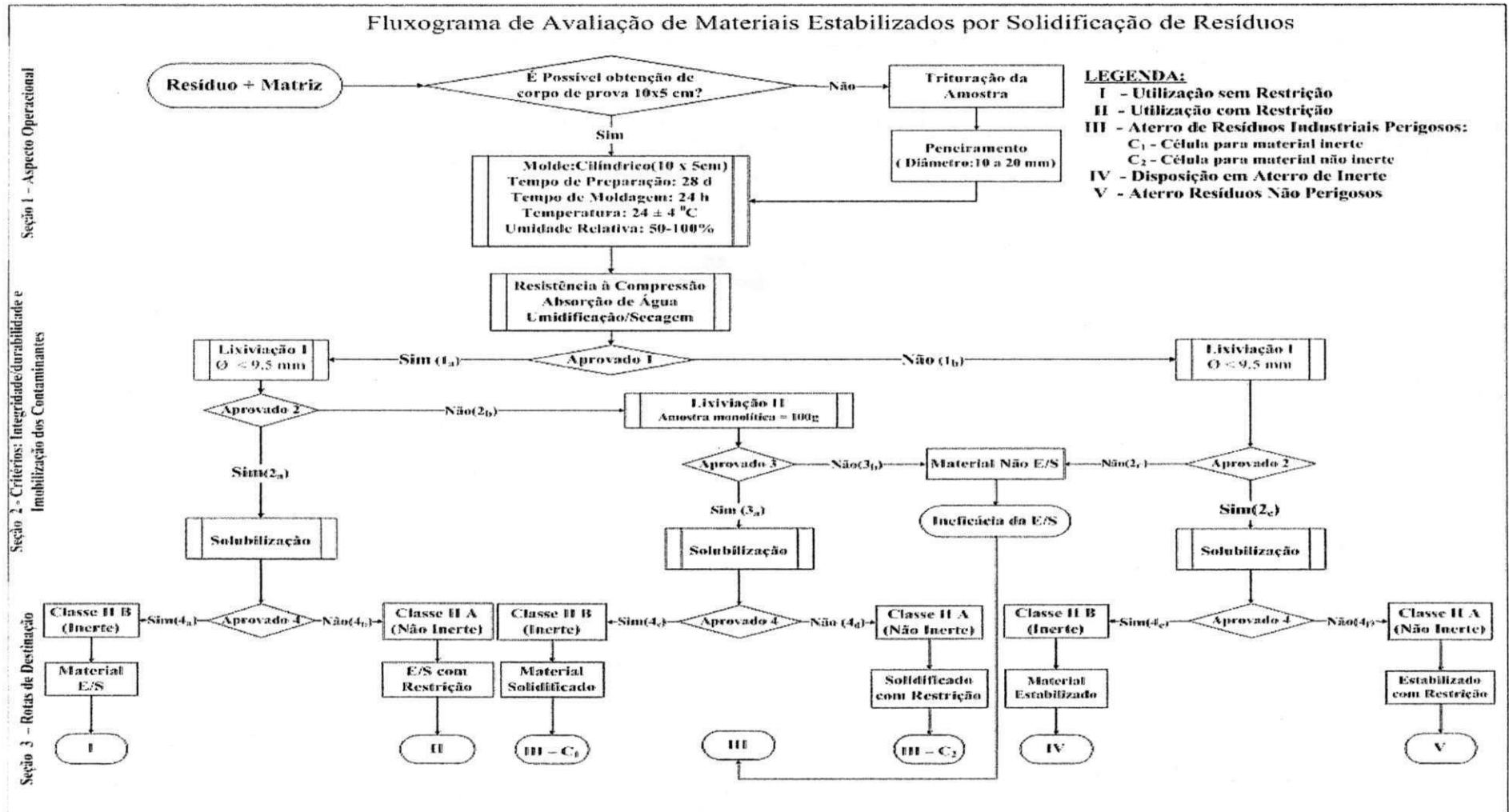
ii) Seção 2: Critérios de avaliação (integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes);

iii) Seção 3: Rotas de destinação.

A opção de usar este modelo de avaliação refere-se ao campo de aplicação do Protocolo que são os resíduos perigosos, excetuando os radioativos, infectantes e explosivos e também por avaliar os materiais em função da legislação brasileira para resíduos sólidos.

Os aglomerantes considerados são aqueles classificados como orgânicos e inorgânicos e o foco da avaliação são os aspectos operacionais, com objetivo de padronizar as condições laboratoriais e de preparação das amostras, os critérios que avaliam a integridade/durabilidade e a imobilização dos compostos perigosos e as rotas de destinação do material estabilizado por solidificação.

O Protocolo, além de sugerir caminhos de destinação do material estabilizado por solidificação em função da qualidade do tratamento, ele apresenta de forma clara e objetiva os procedimentos para condução e a avaliação da eficiência do tratamento e interpretação dos resultados.



Capítulo 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão são apresentados em tabelas e discutidos seguindo a sequência: 1) Classificação do resíduo sólido sintético (RSS); 2) Análise estatística dos dados e do modelo obtido; 3) Avaliação da integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes do material estabilizado por solidificação; 4) Aplicação do Protocolo, 5) Determinação da eficiência de retenção dos contaminantes e 6) Rota de destino do material estabilizado por solidificação.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO SINTÉTICO (RSS)

A TAB. 22 mostra os valores encontrados para os ensaios de lixiviação do RSS, contendo o metal cromo, com seu limite máximo permissível e sua avaliação.

TABELA 22 – Valor obtido para a lixiviação do cromo e seu limite máximo permissível

Parâmetro	Valor obtido mg.L ⁻¹	Valor obtido mg.kg ^{-1*}	Limite máximo permissível mg.kg ^{-1**}	Avaliação
Lixiviação Cr	73,1	1462,0	100,00	Classe I

*: valores médios das amostras; **: ABNT NBR 10004 (2004) e BRITO (2007).

A TAB. 22 apresenta que os valores encontrados para a concentração de cromo no RSS, está acima do limite máximo permitido e, classificado como um material perigoso – Classe I, sendo impróprio o seu lançamento no solo, ou disposição sem tratamento.

O alto valor de cromo indica que o RSS pode causar sérios danos ambientais e a saúde humana, devido a sua principal característica: a toxicidade, contaminando solo e água, sendo, portanto, possível de tratamento antes da disposição final. BOLLA et al. (1990) e LIMA et al. (1996) estudaram trabalhadores de indústrias galvânicas e os resultados mostraram os efeitos do cromo em cromadores, esses estudos apresentaram perfuração do séptico nasal, rinite, ulceração.

4.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA E MODELO OBTIDO PARA INTEGRIDADE/DURABILIDADE

4.2.1 Análise Estatística da Resistência à Compressão (RC)

A TAB. 23 mostra os resultados obtidos para o ensaio de RC realizada nos corpos de prova, contendo o RSS tratado através do processo de estabilização por solidificação, com seus fatores e suas interações, conforme planejamento fatorial com ponto central.

TABELA 23 – Resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão

CP	Fator tempo (t)	Fator percentagem (p)	Nível do fator tempo	Nível do fator percentagem	Resistência à compressão (MPa)
A	-1	-1	1	5	16,65
B	+1	-1	7	5	22,27
C	-1	+1	1	20	12,50
D	+1	+1	7	20	17,12
E ₁	0	0	4	12,5	17,83
E ₂	0	0	4	12,5	16,87
E ₃	0	0	4	12,5	17,11

O valor médio dos pontos fatoriais dos corpos de prova A, B, C e D da RC foi 17,14MPa, pode-se comparar esse valor com a média dos pontos centrais correspondente aos corpos de prova E₁, E₂ e E₃ com 17,27 MPa. Observou-se um pequeno aumento em relação aos pontos centrais de 0,13 MPa (0,75%), significando a existência do modelo linear, pois as médias dos pontos fatoriais e centrais ficaram bem próximos, o modelo poderá ser linear.

A TAB. 24 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de RC e, o efeito do valor de P nos tratamentos com nível de significância de 5% de probabilidade.

TABELA 24 – Análise de Variância (ANOVA) para resistência à compressão

Fontes de variação	G. L.	Soma do Quadrado	Quadrado Médio	Valor P
Efeito principal	2	47,8369	23,9184	0,010
Interação t x p	1	0,2500	0,2500	0,422
Curvatura	1	0,0312	0,0312	0,757
Erro Residual	2	0,4992	0,2496	
Puro Erro	2	0,4992	0,2496	
Total	6	48,6173		
$R^2 = 0,9839$	$R^2_{\max} = 0,9897$	$R = 0,9919$		

G.L: Graus de liberdade; t: Tempo; p: Percentagem; R²: Coeficiente de Determinação; R²_{max}: Explicação Máxima do Modelo; R: Coeficiente de Correlação. Fonte: MINITAB (2006).

Na TAB. 24 da ANOVA para resistência à compressão, observa-se que há efeito significativo dos fatores tempo e percentagem, pois o valor de P (0,01) foi menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$ (5%). Os dados mostram que o modelo consegue explicar no máximo 98,97%, por outro lado, à variação explicável ficou na faixa de 98,39% o modelo não consegue explicar 0,58% que são erros devido ao acaso (aleatoriedade), portanto, o modelo conseguiu explicar quase que totalmente a variação, podendo ser usado para modelar os fatores tempo e percentagem.

Os fatores também possuem uma forte correlação de 0,9919, bem próximo de 1, sendo considerada uma boa correlação entre as variáveis, logo, pode-se concluir que o tempo e a percentagem de RSS influenciam na RC.

A interação entre os fatores não tem influência na variável resposta, pois o valor obtido para P (0,422), foi maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$ (5%) e, quanto ao efeito quadrático (curvatura), pode-se observar que o valor de P (0,757) é maior do que $\alpha = 0,05$ (5%), isso significa que o modelo representa linearmente os dados experimentais, pois não há curvatura.

Com base nos dados obtidos para RC, o modelo que descreveu satisfatoriamente os pontos apresentados está na expressão (12), em que os coeficientes tempo e percentagem foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

$$RC = 17,135 + 2,560xT - 2,325xP \quad (12)$$

Onde:

RC: resistência à compressão;

T: tempo (dias) e

P: percentagem de RSS

Na expressão (12), o T está relacionado com o tempo de estabilização por solidificação em dias e P denota o percentual de RSS. Substituindo respectivamente tempo e percentagem pelos níveis codificados -1 e +1, o valor da RC será aproximadamente 17,4MPa. O valor é aproximadamente 4% superior a 16,65 MPa apresentado na TAB. 26 para 1 dia e 5% de RSS.

O GRÁFICO 4 mostra que o modelo linear obtido descreve adequadamente a influência dos fatores tempo e percentagem de resíduo na RC.

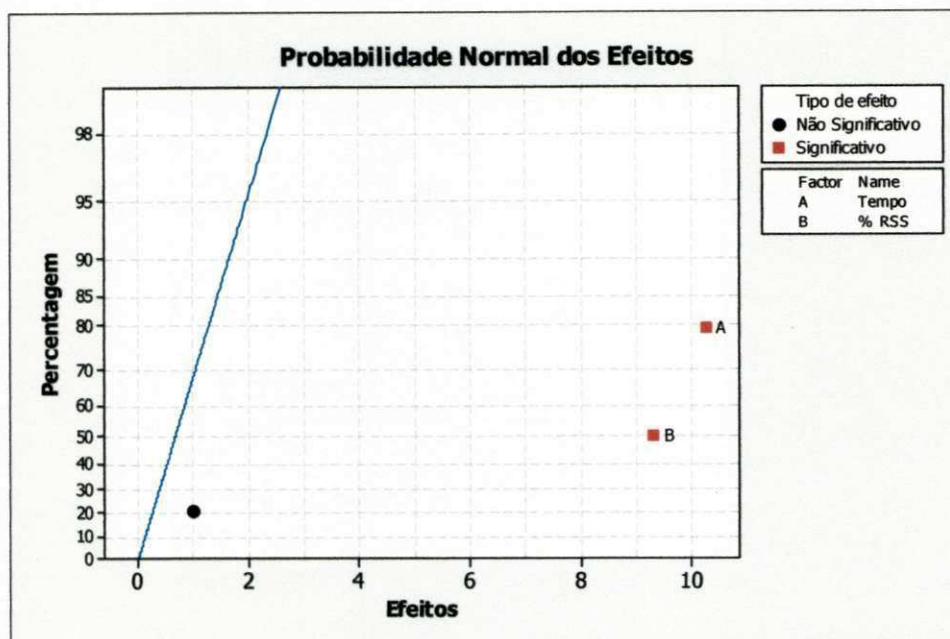


GRÁFICO 4 – Probabilidade normal dos efeitos na resistência à compressão

Pode-se observar através do GRÁFICO 4 que os valores obtidos para tempo (A) e percentagem de resíduo (B) ficaram afastados da reta, mostrando a existência significativa dos fatores A e B na RC. Para a interação entre tempo e percentagem de resíduo (AB), observa-se que não existe efeito significativo entre a interação desses fatores na RC, pois o valor ficou próximo da reta.

4.2.2 Análise estatística da capacidade de absorção de água (CAA)

A TAB. 25 mostra os resultados obtidos para o ensaio de CAA dos corpos de prova, com seus fatores (tempo e percentagem de resíduo) e suas interações.

TABELA 25 – Resultados obtidos para a capacidade de absorção de água

CP	Fator tempo (t)	Fator percentagem (p)	Nível do fator tempo	Nível do fator percentagem	Capacidade de absorção de água (%)
A	-1	-1	1	5	16,99
B	+1	-1	7	5	15,51
C	-1	+1	1	20	18,43
D	+1	+1	7	20	17,17
E ₁	0	0	4	12,5	17,21
E ₂	0	0	4	12,5	17,07
E ₃	0	0	4	12,5	17,67

O valor médio dos pontos fatoriais dos corpos de prova A, B, C e D para a CAA foi 17,03%, comparando esse valor com a média dos pontos centrais correspondente aos corpos de prova E₁, E₂ e E₃ com 17,32 %, pode-se observar que houve uma pequena variação entre os valores, a diferença de 0,29%, mostrando a existência do modelo linear. Segundo MONTGOMERY e RUGER (2003), quando a diferença é pequena entre as médias dos pontos fatoriais e centrais o modelo que descreve os dados será o modelo linear.

A TAB. 26 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de CAA e, o efeito do valor de P ao nível de significância de 5% de probabilidade.

TABELA 26 – Análise de Variância (ANOVA) para capacidade de absorção de água

Fontes de variação	G. L.	Soma do Quadrado	Quadrado Médio Ajustado (QM)	Valor P
Efeito principal	2	4,27940	2,13970	0,044
Interação t x p	1	0,01210	0,01210	0,759
Curvatura	1	0,14583	0,14583	0,348
Erro Residual	2	0,19707	0,09853	
Puro Erro	2	0,19707	0,09853	
Total	6	4,63440		
$R^2 = 0,9234$	$R^2_{\max} = 0,9575$	$R = 0,9609$		

G.L: Graus de liberdade; t: Tempo; p: Percentagem; R^2 : Coeficiente de Determinação; R^2_{\max} : Explicação Máxima do Modelo; R: Coeficiente de Correlação.

Fonte: MINITAB (2006).

A TAB. 26 indica evidência do efeito principal (tempo e percentagem), o tempo e a percentagem influenciaram no resultado da capacidade de absorção de água, pois o valor de P(0,044) foi menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$ (5%). Os dados mostram que o modelo consegue explicar no máximo 95,75%, por outro lado, à variação explicável ficou na faixa de 92,34%, o modelo não consegue explicar 3,41 %, que são erros devido ao acaso (aleatoriedade), portanto, o modelo conseguiu explicar quase que totalmente a variação, pode ser usado para modelar os fatores tempo e percentagem.

Os fatores também possuem uma forte correlação de 0,9609, bem próximo de 1, sendo considerada uma boa correlação entre as variáveis tempo e percentagem de resíduo, logo, pode-se concluir que o tempo e percentagem de RSS influenciam na CAA.

Para a interação entre os fatores os efeitos não foram significativos, pois o valor de P (0,759) é maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$ (5%), não exercendo nenhuma influência na capacidade de absorção de água, o tempo e a percentagem em conjunto não influenciam na CAA.

Quanto ao efeito quadrático (curvatura), o valor obtido para o P (0,348) é maior que $\alpha = 0,05$ (5%), não havendo curvatura na região avaliada, os dados experimentais se ajustam ao modelo linear, conforme a expressão 13. Se o valor P calculado for menor que 0,05 haveria curvatura e havendo curvatura o modelo quadrático seria usado e testado, ampliando os níveis dos fatores.

$$CAA(\%) = 17,0250 - 0,6850xT + 0,7750xP \quad (13)$$

Onde:

CAA (%): Capacidade de absorção de água;

T: Tempo (dias) e

P: Percentagem de resíduo sólido sintético.

Na expressão 13 substituindo respectivamente tempo e percentagem pelos níveis codificados -1 e +1, o valor da capacidade de absorção de água será aproximadamente 16,94MPa. O valor é aproximadamente 0,30% inferior a 16,99 MPa apresentado na TAB. 28 para 1 dias e 5% de resíduo sólido sintético.

O GRÁFICO 5 mostra que o modelo linear obtido descreve adequadamente a influência dos fatores tempo e percentagem de resíduo na capacidade de absorção de água.

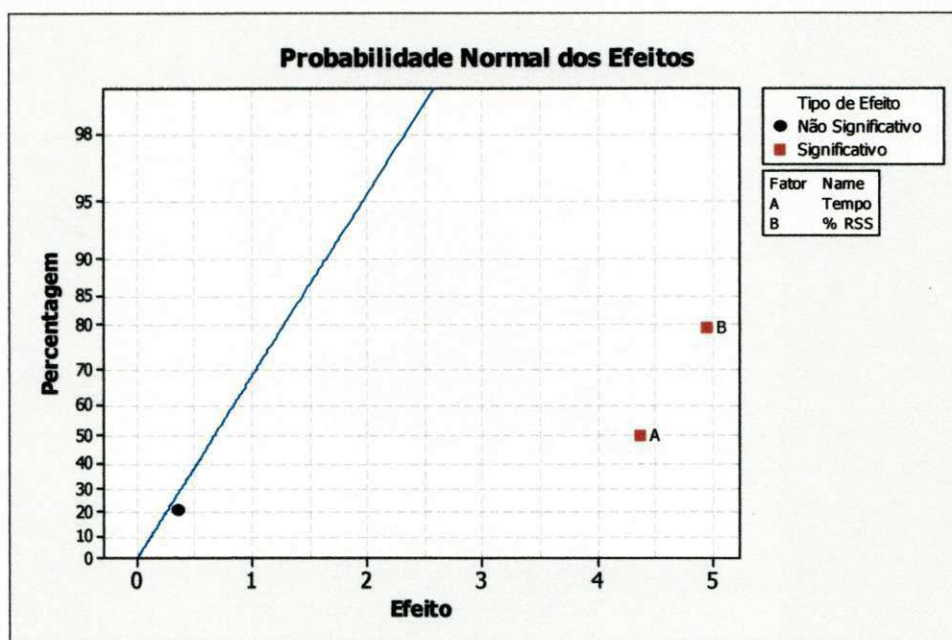


GRÁFICO 5 – Probabilidade normal dos efeitos na capacidade de absorção de água

Observa-se através do GRÁFICO 5 que os valores obtidos para tempo (A) e percentagem de resíduo (B) ficaram afastados da reta, mostrando o efeito significativo dos fatores na CAA. Para a interação entre tempo e percentagem de resíduo (AB), portanto, não existe efeito significativo entre os fatores na CAA, pois o valor ficou próximo da reta.

4.2.3 Análise estatística de umidificação/secagem (U/S)

A TAB. 27 mostra os resultados obtidos para o ensaio de umidificação/secagem, com os fatores (tempo e percentagem de RSS) e os níveis codificados (-1 e +1).

TABELA 27 – Resultados obtidos para a umidificação/secagem

CP	Fator tempo (t)	Fator percentagem (p)	Nível do fator tempo	Nível do fator percentagem	Umidificação secagem (%)
A	-1	-1	1	5	9,50
B	+1	-1	7	5	8,21
C	-1	+1	1	20	11,71
D	+1	+1	7	20	9,76
E ₁	0	0	4	12,5	10,59
E ₂	0	0	4	12,5	10,84
E ₃	0	0	4	12,5	10,12

O valor médio dos pontos fatoriais nos corpos de prova A, B, C e D para U/S foi 9,80%, comparando esse valor com a média dos pontos centrais correspondente aos corpos de prova E₁, E₂ e E₃ com 10,55 %, pode-se observar que houve uma pequena variação entre os valores, com aumento de 0,75%, mostrando a existência do modelo linear.

A TAB. 28 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de U/S e, o efeito do valor de P nos tratamentos com nível de significância de 5% de probabilidade.

TABELA 28 – Análise de variância (ANOVA) para umidificação/secagem

Fontes de variação	G. L.	Soma do Quadrado	Quadrado Médio Ajustado (QM)	Valor P
Efeito principal	2	6,1588	3,0794	0,042
Interação t x p	1	0,1089	0,1089	0,462
Curvatura	1	0,8928	0,8928	0,123
Erro Residual	2	0,2673	0,2673	
Puro Erro	2	0,2673	0,2673	
Total	6	7,4278		
R ² = 0,8291		R ² max = 0,9640		R = 0,9105

G.L: Graus de liberdade; t: Tempo; p: Percentagem; R²: Coeficiente de Determinação; R²max: Explicação Máxima do Modelo; R: Coeficiente de Correlação.

Fonte: MINITAB (2006).

Na TAB. 28 constatou-se que ocorreu efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade para os fatores principais (tempo e percentagem de resíduo sólido sintético), pode-se observar que há efeito significativo dos fatores, pois o valor P (0,042) é maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$ (5%). Os dados mostram que o modelo consegue explicar no máximo 96,40% o modelo não consegue explicar 13,49 % que são erros do acaso (aleatoriedade), por outro lado, à variação explicável ficou na faixa de 82,91%, portanto, o modelo conseguiu explicar quase que totalmente a variação, podendo ser usado para modelar os fatores tempo e percentagem.

Os fatores também possuem uma forte correlação de 0,9105, bem próximo de 1, sendo considerada uma boa correlação entre as variáveis tempo e percentagem de resíduo, logo, pode-se concluir que o tempo e percentagem de RSS influenciaram na U/S.

Na interação entre os fatores os resultados mostraram que não houve efeito significativo, logo, o valor obtido para P (0,462) é maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$ (5%), a interação não exercem influência na U/S.

Quanto ao efeito da curvatura, pode-se observar que o valor de P (0,123) é maior que $\alpha = 0,05$ (5%) e com base nos dados obtidos, o modelo que melhor se ajusta a U/S é o modelo linear, (expressão 14):

$$U/S = 9,7959 - 0,8100xT + 0,9400xP \quad (14)$$

Onde:

U/S: Umidificação/secagem;

T: tempo (dias) e

P: Percentagem de resíduo sólido sintético.

Na expressão 14 substituindo respectivamente tempo e percentagem pelos níveis codificados -1 e +1, o valor da umidificação/secagem foi aproximadamente 9,67%. O valor é aproximadamente 1,79% superior a 9,50% apresentado na TAB. 30 para 1 dias e 5% de resíduo sólido sintético.

O GRÁFICO 6 mostra que o modelo linear obtido descreve adequadamente a influência dos fatores tempo e percentagem de resíduo na umidificação/secagem.

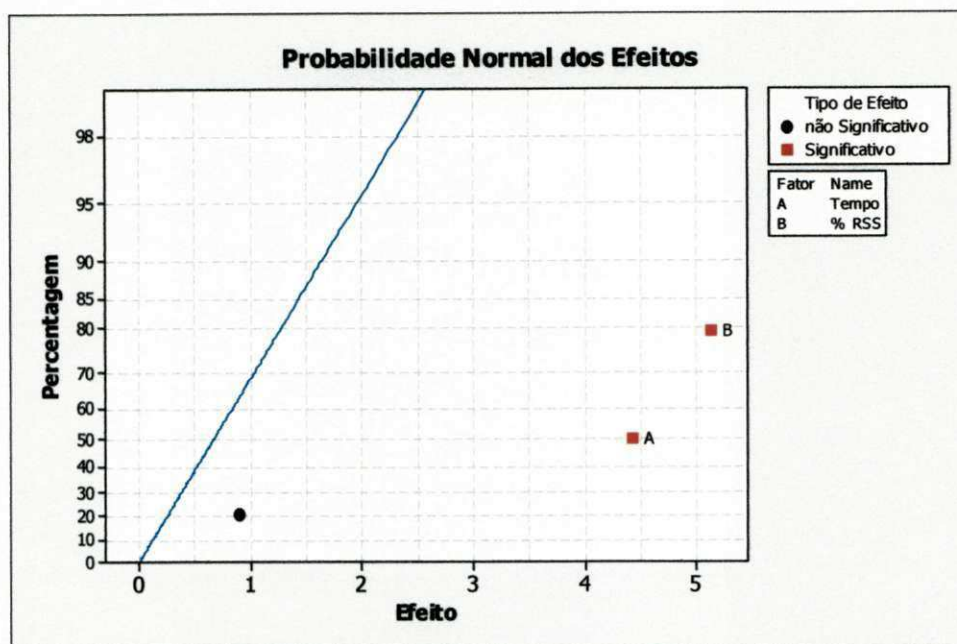


GRÁFICO 6 – Probabilidade normal dos efeitos na umidificação/secagem

Observa-se através do GRÁFICO 6 que os valores obtidos para tempo (A) e percentagem de resíduo (B) ficaram afastados da reta, mostrando o efeito significativo dos fatores na umidificação/secagem. Para a interação tempo e percentagem de resíduo (AB), observa-se que não existe efeito significativo entre os fatores na umidificação/secagem de água, pois o valor ficou próximo da reta.

4.3 AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE/DURABILIDADE DO MATERIAL ESTABILIZADO POR SOLIDIFICAÇÃO

A avaliação foi feita em relação às variáveis de resistência à compressão, capacidade de absorção de água e umidificação/secagem, através dos resultados obtidos experimentalmente podem-se observar a influência do tempo e percentagem de resíduo sólido sintético.

4.3.1 Avaliação da resistência à compressão (RC)

Os resultados obtidos para RC, mostram que a maior resistência foi para uma menor percentagem de RSS com 5%, e maior tempo de cura com 7 dias, obtendo-se resistência à compressão de 22,27 MPa. Por outro lado, com uma maior percentagem de RSS com 20% e, menor tempo de cura com 1 dia, obteve-se uma menor resistência à compressão de 12,50MPa.

No presente trabalho pode-se observar que os valores de RC com tempo de 7 dias, ficaram próximos dos resultados obtidos pelos autores: PINTO et al. (2002), PRIM et al. (2009), PIETROBON et al. (2004), HEREK et al. (2005), GUIMARÃES (2008), BRITO e SOARES (2009) e ROJAS et al. (2009) com tempos de cura maiores.

PINTO et al. (2002) utilizaram cimento e argila para estabilizar por solidificação o lodo de curtume e os resultados mostraram que o uso de resíduo, diminuiu sua resistência à compressão de 33,2 MPa (cimento, argila e lodo) para 28,9 MPa (cimento e lodo), após 28 dias de cura. Houve uma diminuição de 12,95% na resistência à compressão.

PRIM et al. (2009) utilizaram o cimento para estabilizar por solidificação o lodo têxtil. Os autores constataram que à medida que aumenta a percentagem de resíduo e diminui o tempo de cura, há influência na resistência à compressão. Os resultados mostraram que para um tempo de 28 dias e 10 % resíduo a resistência à compressão foi igual a 36,36 MPa e, para o mesmo tempo e 40% resíduo a resistência foi igual a 14,67 MPa, houve uma redução da resistência de 59,65%.

Trabalho realizado por PIETROBON et al. (2004), utilizaram como aglomerante o cimento Portland CII Z, para o tratamento do lodo têxtil de uma lavanderia industrial, os autores comparam a resistência dos corpos de prova com 0% a 20% de lodo. Os resultados encontrados para a resistência à compressão com 7 dias de cura foram: para 0% de lodo no corpo de prova obteve uma resistência de 42,79 MPa e 20% de lodo 30,31 MPa. Observaram que a percentagem de resíduo influenciou na resistência à compressão, quanto maior resíduo de lodo na massa, menor é a resistência dos corpos de prova, obtendo uma redução de 29,17% na resistência final, após acréscimo de 20% de lodo.

HEREK et al. (2005) confeccionaram-se os corpos de prova com argila e lodo, observaram que 10% de lodo e 90 dias de cura, a resistência à compressão foi aproximadamente igual a 5 MPa.

GUIMARÃES (2008) utilizou o processo estabilização por solidificação, para isso utilizou-se lodo primário de curtume e cimento. O melhor resultado foi para um menor tempo de 28 dias e menor percentagem de lodo de 5%, obtendo uma resistência à compressão igual a 3,3205 MPa.

BRITO e SOARES (2009) utilizaram o cimento, argila e hidróxido de cálcio para estabilizar por solidificação o resíduo sólido sintético, os autores comparam a resistência à compressão dos corpos de prova com 0% a 60% de resíduo. Os resultados mostraram que 0% resíduo a resistência foi igual a 6,563 MPa e, com 60% de resíduo a resistência foi de 4,470 MPa.

Trabalho realizado por ROJAS et al. (2009), utilizaram como aglomerante o cimento e, contaminante a borra oleosa ácida, obtiveram a maior resistência com maior tempo e menor porcentagem de resíduo, com resistência média 6,80 MPa e, com acréscimo de borra na massa, essa resistência diminuiu para 2,92 MPa (57,06%).

PIETROBON et al (2004) utilizaram outro tipo de cimento CII Z, obtendo uma maior resistência à compressão com um tempo de 7 dias e 20% de lodo de 30,31 MPa. O presente trabalho utilizou o cimento CII F32, obteve uma menor resistência à compressão com o mesmo tempo e porcentagem de resíduo com 17,12 MPa, com redução de 43,52% na resistência.

ROJAS et al. (2009) obteve uma resistência à compressão igual a 1,09 MPa com 7 dias e 6% de borra com aglomerante diferente (cimento – CPV ARI), ficando bem abaixo da resistência obtida neste trabalho com tempo de 7 dias e 20% de resíduo com 22,27 MPa, aumento de aproximadamente 22 vezes na resistência.

PRIM et al. (2009) usando um tempo de 7 dias e 20% de lodo obtiveram uma resistência igual a 29,72 MPa, com utilização do cimento Portland simples, ficando próximo do resultado encontrado no presente trabalho.

GUIMARÃES (2008) também utilizou o cimento Portland para estabilizar por solidificação o material contaminado (lodo) e, com o tempo de 7 dias e 5% de resíduo. O resultado encontrado para a resistência à compressão foi igual a 1,98 MPa, ficando abaixo do valor obtido neste trabalho de 22,27 MPa.

Os mesmos autores citados acima, realizaram experimentos com tempo de cura e porcentagem de resíduo em quantidade maior que a utilizada nesse trabalho. Alguns com resistências maiores nos 28 dias como PINTO et al. (2002) e PRIM et al. (2009) e outros com resistência menores como GUIMARÃES (2008) e BRITO e SOARES (2009).

4.3.2 Avaliação da capacidade de absorção de água (CAA)

Nos resultados obtidos na avaliação da capacidade de absorção de água para os corpos de prova, observa-se que a menor capacidade de absorção de água foi para um tempo de 7 dias e 5% de RSS com 15,51 % e maior absorção de água com tempo de 1 dia e 20% de RSS em 18,43%, aumento de 18,83%. Comparando os resultados obtidos no trabalho realizado com outros autores como: PINTO et al. (2002), HEREK et al (2005), BRITO e SOARES (2009) e GUIMARÃES (2008), pode-se verificar:

PINTO et al. (2002) compararam aglomerantes com e sem o resíduo na massa, constataram que houve aumento na capacidade de absorção de água em 14,6%, quando se utilizou o resíduo na composição.

HEREK et al. (2005) utilizaram argila como aglomerante e quantidade de 0% e 20% de resíduo para confecção dos corpos de prova, os resultados mostraram que para 0% a capacidade de absorção de água foi de 18% em 90 dias de cura. Para 20% a capacidade de absorção de água chegou a 24% no mesmo período de tempo, aumento de 33,33% na absorção de água, observaram que quanto maior a porcentagem de resíduo nos corpos de prova, maior é sua absorção.

BRITO e SOARES (2009) mostraram que em 0% de resíduo na massa a capacidade de absorção de água foi de 37,06% e, com acréscimo de 60% do resíduo na massa o valor para capacidade de absorção foi 38,58%, aumento na capacidade de absorção de água de 4,11%.

GUIMARÃES (2008) obteve com porcentagem de 5% de resíduo na massa e tempo de 7 dias uma capacidade de absorção de 20,71%. Com porcentagem de 45% e 7 dias de cura a capacidade foi de 29,30% e, aumento na capacidade de absorção de água de 41,48%.

4.3.3 Avaliação de umidificação/secagem (U/S)

Para a avaliação de U/S, observa-se que o melhor resultado foi de 8,21% (5% de RSS e tempo de 7 dias) e com uma maior porcentagem (20%) e menor tempo (1 dia), o valor obtido foi 11,71%. Comparando os resultados obtidos no presente trabalho, com os realizados por outros autores, observa-se:

GUIMARÃES (2008) estudou o comportamento dos corpos de prova quando submetidos a U/S e, observou que o tempo de 7 dias e porcentagem (5% de lodo), obteve uma U/S de 7,88% e, com mesmo tempo e quantidade de resíduo maior de 45% a U/S foi 19,94%.

BRITO e SOARES (2009) compararam a quantidade de RSS na massa e, observaram que para 0% de resíduo encontraram uma U/S de 10,814% e, com 50% de resíduo a U/S foi 11,951%. Os mesmo autores utilizaram porcentagem com até 60% de resíduo obtendo uma média de aproximadamente 10%.

GUIMARÃES (2008) obteve uma média igual a 8% com tempo (7, 14 e 28 dias) e porcentagem de lodo (5, 25 e 45%), enquanto, que a média dos valores obtidos no presente trabalho foi 10,10%.

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS E MODELO OBTIDO PARA IMOBILIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES

4.4.1 Análise estatística para lixiviação

A TAB. 29 mostra os resultados obtidos para o ensaio de lixiviação dos corpos de prova, com seus fatores (tempo e percentagem RSS) e os níveis codificados (-1 e +1).

TABELA 29 – Resultados obtidos para o ensaio de lixiviação

CP	Fator tempo (t)	Fator percentagem (p)	Nível do fator tempo	Nível do fator percentagem	Lixiviação (mg.kg ⁻¹)
A	-1	-1	1	5	1,99
B	+1	-1	7	5	2,40
C	-1	+1	1	20	2,19
D	+1	+1	7	20	1,99
E ₁	0	0	4	12,5	2,00
E ₂	0	0	4	12,5	2,19
E ₃	0	0	4	12,5	2,60

O valor médio dos pontos fatoriais nos corpos de prova A, B, C e D para o ensaio de lixiviação foi 2,14 mg.kg⁻¹, comparando esse valor com a média dos pontos centrais correspondente aos corpos de prova E₁, E₂ e E₃ com 2,26 mg.kg⁻¹, pode-se observar que houve uma pequena variação entre os valores, com aumento de 0,12 mg.kg⁻¹, devido a pequena diferença o modelo poderá ser linear.

A TAB. 30 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de lixiviação e, o efeito do valor de P nos tratamentos com nível de significância de 5% de probabilidade.

TABELA 30 – Análise de Variância (ANOVA) para lixiviação

Fontes de variação	G. L.	Soma do Quadrado	Quadrado Médio	Valor P
Efeito principal	2	0,022050	0,01102	0,895
Interação t x p	1	0,093025	0,09302	0,425
Curvatura	1	0,025030	0,02503	0,657
Erro Residual	2	0,188067	0,09403	
Puro Erro	2	0,188067	0,09403	
Total	6	0,328171		
R ² = 0,0672	R ² max = 0,4269	R = 0,2592		

G.L.: Graus de liberdade; t: Tempo; p: Percentagem; R²: Coeficiente de Determinação; R²max: Explicação Máxima do Modelo; R: Coeficiente de Correlação.

Fonte: MINITAB (2006).

Com resultados da TAB. 30 da ANOVA para lixiviação, observa-se que não há efeito significativo dos fatores tempo e percentagem de resíduo sólido sintético (cromo), pois, o valor de P (0,895) foi maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$ (5%). Os dados mostram que o modelo consegue explicar no máximo 42,69%, por outro lado, a variação explicável ficou em 6,72%, o modelo não consegue explicar 35,97 que são erros devido ao acaso (aleatoriedade), existindo correlação fraca entre as variáveis de 0,2592, concluiu-se que o tempo e a percentagem de resíduo sólido sintético não influenciam na lixiviação.

A interação entre os fatores não tem influência na variável resposta, pois, o valor obtido para P (0,425), foi maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$ (5%) e quanto ao efeito quadrático (curvatura), pode-se observar que o valor de P (0,657) é maior do que $\alpha = 0,05$ (5%).

Com base nos dados obtidos para lixiviação, não foi possível chegar a um modelo que descrevesse satisfatoriamente os pontos apresentados, pois, os coeficientes não foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

O GRÁFICO 7 mostra que os fatores tempo, percentagem e a interação entre os fatores não influenciaram na lixiviação.

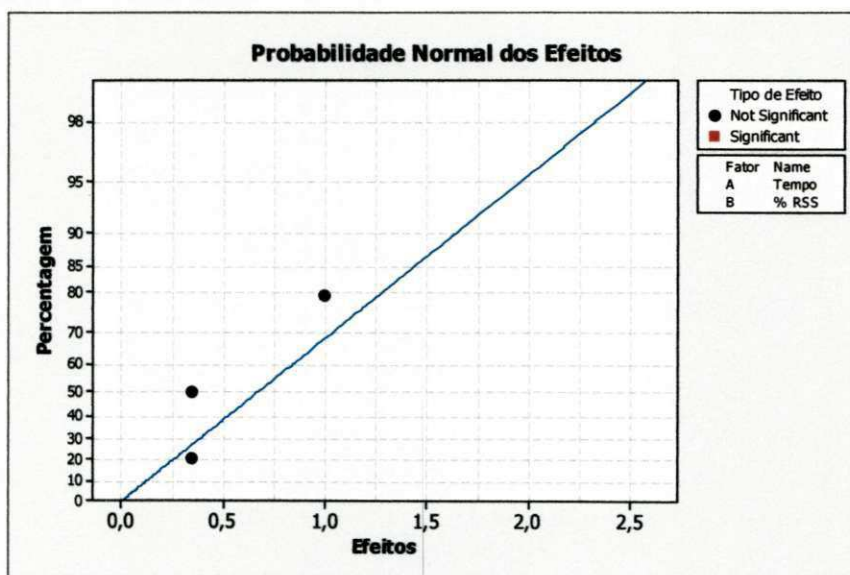


GRÁFICO 7 – Probabilidade normal dos efeitos na lixiviação

Observa-se através do GRÁFICO 7 que os valores obtidos para tempo (A), percentagem de resíduo (B) e a interação tempo e percentagem de resíduo (AB), ficaram próximos da reta, confirmando que não há efeito significativo entre os fatores na lixiviação.

4.4.2 Análise estatística para solubilização

A TAB. 31 mostra os resultados obtidos para o ensaio de solubilização do material E/S, com seus fatores (tempo e percentagem RSS) e os níveis codificados (-1 e +1).

TABELA 31 – Resultados obtidos para o ensaio de solubilização

CP	Fator tempo (t)	Fator percentagem (p)	Nível do fator tempo	Nível do fator percentagem	Solubilização (mg.kg ⁻¹)
A	-1	-1	1	5	0,44
B	+1	-1	7	5	0,40
C	-1	+1	1	20	0,44
D	+1	+1	7	20	0,40
E ₁	0	0	4	12,5	0,40
E ₂	0	0	4	12,5	0,84
E ₃	0	0	4	12,5	2,12

O valor médio dos pontos fatoriais nos corpos de prova A, B, C e D para o ensaio de solubilização foi 0,42 mg.kg⁻¹, comparando esse valor com a média dos pontos centrais correspondente aos corpos de prova E₁, E₂ e E₃ com 1,12 mg.kg⁻¹, pode-se observar que houve uma certa variação entre os valores, aumento de 0,70 mg.kg⁻¹ (166,67%), sendo um valor bastante elevado.

A TAB. 32 apresenta a ANOVA para os resultados do ensaio de lixiviação e, o efeito do valor de P nos tratamentos com nível de significância de 5% de probabilidade.

TABELA 32 – Análise de variância (ANOVA) para solubilização

Fontes de variação	G. L.	Soma do Quadrado	Quadrado Médio	Valor P
Efeito principal	2	0,00160	0,000800	0,999
Interação t x p	1	0,00000	0,000000	1,000
Curvatura	1	0,84000	0,840000	0,413
Erro Residual	2	1,59680	0,798400	
Puro Erro	2	1,59680	0,798400	
Total	6	2,43840		
R ² = 0,000656	R ² max = 0,345	0,0256		

G.L.: Graus de liberdade; t: Tempo; p: Percentagem; R²: Coeficiente de Determinação
Fonte: MINITAB (2006).

Com resultados da TAB. 32 da ANOVA para solubilização, observa-se que não há efeito significativo dos fatores tempo e percentagem de resíduo sólido sintético (cromo), pois, o valor de P (0,999) foi maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$ (5%). Os dados mostram que o modelo consegue explicar no máximo 34,50%. Por outro lado à variação explicável

ficou na faixa de 0,0656%, portanto, é um valor baixo e, não pode ser usado para modelar os fatores tempo e percentagem.

Como a variável explicável foi de 0,0656%, o modelo não consegue explicar 34,43%, que são erros devido ao acaso (aleatoriedade). Existindo correlação fraca entre as variáveis de 0,0256.

A interação entre os fatores não tem influência na variável resposta, pois, o valor obtido para P (1,000), sendo maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$ (5%) e quanto ao efeito quadrático (curvatura), pode-se observar que o valor de P (0,413) é maior do que $\alpha = 0,05$ (5%).

Com base nos resultados obtidos para solubilização, não foi possível chegar a um modelo que descrevesse satisfatoriamente os pontos apresentados, pois, os coeficientes não foram significativos ao nível de 5% de probabilidade, já que a variação explicável do modelo linear foi muito baixa 0,0656%. Para modelar deve-se ampliar os níveis dos fatores tempo e percentagem do RSS.

O GRÁFICO 8 mostra que os fatores tempo, percentagem e a interação entre os fatores não influenciaram na solubilização.

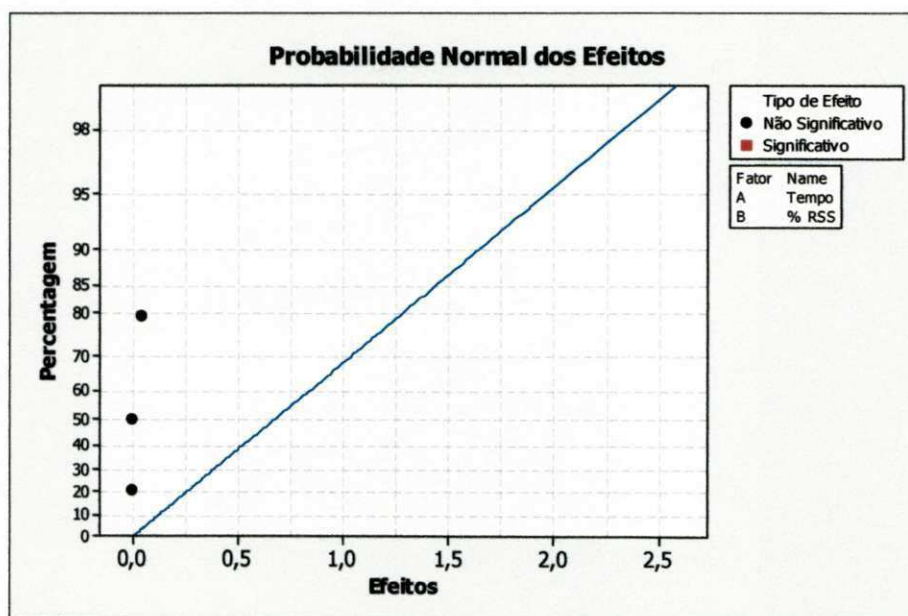


GRÁFICO 8 – Probabilidade normal dos efeitos na solubilização

Observa-se através do GRÁFICO 8 que os valores obtidos para tempo (A), percentagem de resíduo (B) e a interação tempo e percentagem de resíduo (AB), ficaram próximos da reta, confirmando que não há efeito significativo entre os fatores na solubilização.

4.5 AVALIAÇÃO DA IMOBILIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES DO MATERIAL ESTABILIZADO POR SOLIDIFICAÇÃO

4.5.1 Avaliação da lixiviação

Os resultados obtidos para lixiviação, mostraram que não houve grandes diferenças nos valores encontrados para os tratamentos, independente do tempo e percentagem de resíduo utilizado. A menor concentração foi $1,99 \text{ mg.kg}^{-1}$ tanto para um tempo de 1 dia e 5% de resíduo, quanto, para 7 dias e 20% de resíduo e a maior concentração foi $2,4 \text{ mg.kg}^{-1}$ para 7 dias e 5% de resíduo, mostrando que não houve muita influência dos fatores (tempo e percentagem de RSS) na lixiviação, após, o tratamento do material E/S.

PINTO et al. (2002) utilizaram dois tipos de argilas a bentonita sódica e organofílica e cimento para estabilizar o lodo de curtume contendo cromo e quando os autores misturaram o cimento e resíduo, obtiveram lixiviação ($2,07 \text{ mg.kg}^{-1}$) de cromo aos 28 dias de cura. No presente trabalho a maior quantidade de lixiviado obtido foi de $2,60 \text{ mg.kg}^{-1}$, com tempo de 7 dias e percentagem de 12,5% de RSS contendo cromo. Quando os autores acrescentaram a bentonita sódica na composição anterior obteve uma lixiviação de $1,85 \text{ mg.kg}^{-1}$, obtendo uma maior retenção do cromo na massa sólida. Por fim misturaram a organofílica, o resultado encontrado foi bem melhor com uma lixiviação de $1,47 \text{ mg.kg}^{-1}$. Apesar de um tempo de cura pequeno (4 dias) utilizado no presente trabalho, o resultado foi bem satisfatório, pois PINTO et al. (2002) utilizaram um tempo bem maior (28 dias).

HEREK et al. (2005) utilizaram somente argila como aglomerante e os resultados mostraram satisfatórios, com tempo de 7 dias e 10% de lodo, obtiveram-se para o cromo uma lixiviação de $0,6 \text{ mg.kg}^{-1}$, já no presente trabalho para um tempo de 7 dias e 20% de RSS o valor obtido foi $1,99 \text{ mg.kg}^{-1}$, os mesmos autores utilizaram o tempo de 7 dias e 20% de lodo e os resultados foram satisfatórios, não detectando nenhuma concentração de cromo no lixiviado.

4.5.2 Avaliação da solubilização

Os resultados para solubilização mostram que o menor valor obtido foi $0,40 \text{ mg.kg}^{-1}$, seja para um tempo de 7 dias e 5% de resíduo, quanto, para 7 dias e 20%, o maior valor foi obtido no ponto central com tempo de 4 dias e 12,5% de RSS ($2,12 \text{ mg.kg}^{-1}$).

BRITO e SOARES (2009) prepararam o RSS contendo chumbo (Pb), cádmio (Cd) e cobre (Cu), os valores obtidos com tempo de 28 dias e 40% de resíduo foi $0,014 \text{ mg.kg}^{-1}$ para o cádmio, $0,300 \text{ mg.kg}^{-1}$ para o chumbo e $0,060 \text{ mg.kg}^{-1}$ para o cobre. Comparando esses valores com os obtidos no presente trabalho para um tempo 7 dias e 20% de resíduo que foi $0,40 \text{ mg.kg}^{-1}$, a grande diferença é devido uma baixa concentração de metais contido no RSS produzido por BRITO e SOARES (2009).

GUIMARÃES (2008) obteve como resultado para a solubilização do cromo igual a $2,72 \text{ mg.kg}^{-1}$ para um tempo de 7 dias e 5% de lodo. Comparando esse valor obtido no presente trabalho que foi de $0,40 \text{ mg.kg}^{-1}$, com mesmo tempo e porcentagem de resíduo, utilizado por GUIMARÃES (2008), pode-se observar que o resultado foi satisfatório, com pequena solubilização.

4.6 AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS E APLICAÇÃO DO PROTOCOLO

Os materiais obtidos foram avaliados utilizando o Protocolo de Avaliação de Materiais estabilizados por solidificação (BRITO, 2007).

A TAB. 33 mostra os limites máximos permissíveis, estabelecidos no Protocolo, para avaliar o critério de integridade/durabilidade dos materiais.

TABELA 33 – Critérios de integridade/durabilidade e limites máximos permissíveis

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

Fonte: BRITO (2007).

Para uma amostra ser aprovada neste critério (integridade/durabilidade), deverá ser aprovado nos três ensaios: resistência à compressão (RC), capacidade de absorção de água (CAA) e umidificação/secagem (U/S). Vale salientar que, quanto maior for o resultado para

resistência à compressão e menores forem à capacidade de absorção de água e umidificação/secagem, melhor será a avaliação do material estabilizado por solidificação.

Os limites máximos permissíveis, referenciados no Protocolo, para avaliar o critério de imobilização dos contaminantes presentes nas amostras, estão apresentados na TAB. 33. Tal como no critério de integridade/durabilidade, para uma amostra ser aprovada neste critério, deverá ser aprovada nos dois ensaios: lixiviação e solubilização, porém o material sendo aprovado no ensaio de lixiviação não será considerado perigoso.

Diferente do que a Norma ABNT NBR 10.004 recomenda, o Protocolo converte os valores em mg.L^{-1} para os ensaios de lixiviação e solubilização para mg.kg^{-1} , em função da relação S/L (sólido/líquido) dos respectivos ensaios, 1:20 para a lixiviação e 1:4 para a solubilização (BRITO, 2007).

Os corpos de prova foram avaliados comparando-se os resultados obtidos nos ensaios realizados, com os valores apresentados nas TAB. 34 e 35.

TABELA 34 – Limites máximos permissíveis para lixiviação e solubilização de alguns contaminantes.

Parâmetro (contaminante)	Lixiviação (mg.kg^{-1})	Solubilização (mg.kg^{-1})
Arsênio	20,0	0,04
Arsênio	4,0	0,8
Bário	1400,0	2,8
Cádmio	10,0	0,03
Chumbo	20,0	0,02
Cobre	40,0	8,0
Cromo Total	100,0	0,2
Ferro	6,0	1,2
Fluoreto	3000,0	6,0
Manganês	2,0	0,4
Mercúrio	2,0	0,004
Níquel	0,4	0,08
Nitrato	200,0	40,0
Nitrito	20,0	4,0
Prata	25,0	0,20
Selênio	20,0	0,04
Zinco	100,0	20,0

Fonte: BRITO (2007)

A TAB. 34 mostra o resultado da avaliação dos tratamentos A, B, C, D e E, para integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes e seus limites máximos.

TABELA 35 – Avaliação dos corpos de prova

CORPO DE PROVA A (1 dias e 5% de resíduo sólido sintético)			
Ensaio	Parâmetro	Resultado Obtido	Avaliação
RC (MPa)	≥ 1	16,65	Aprovado
CAA (%)	≤ 40	16,99	Aprovado
U/S (%)	≤ 15	9,50	Aprovado
Ensaio	LMP	Resultado Obtido	Avaliação
	Cr	Cr	
Lixiviação (mg.kg ⁻¹)	100,0	1,99	Classe II
Solubilização (mg.kg ⁻¹)	0,2	0,44	Classe II A
CORPO DE PROVA B (7 dias e 5% de resíduo sólido sintético)			
Ensaio	Parâmetro	Resultado Obtido	Avaliação
RC (MPa)	≥ 1	22,27	Aprovado
CAA (%)	≤ 40	15,51	Aprovado
U/S (%)	≤ 15	8,21	Aprovado
Ensaio	LMP	Resultado Obtido	Avaliação
	Cr	Cr	
Lixiviação (mg.kg ⁻¹)	100,0	2,40	Classe II
Solubilização (mg.kg ⁻¹)	0,2	0,40	Classe II A
CORPO DE PROVA C (1 dias e 20% de resíduo sólido sintético)			
Ensaio	Parâmetro	Resultado Obtido	Avaliação
RC (MPa)	≥ 1	12,50	Aprovado
CAA (%)	≤ 40	18,43	Aprovado
U/S (%)	≤ 15	11,71	Aprovado
Ensaio	LMP	Resultado Obtido	Avaliação
	Cr	Cr	
Lixiviação (mg.kg ⁻¹)	100,0	2,19	Classe II
Solubilização (mg.kg ⁻¹)	0,2	0,44	Classe II A
CORPO DE PROVA D (7 dias e 20% de resíduo sólido sintético)			
Ensaio	Parâmetro	Resultado Obtido	Avaliação
RC (MPa)	≥ 1	17,12	Aprovado
CAA (%)	≤ 40	17,17	Aprovado
U/S (%)	≤ 15	9,76	Aprovado
Ensaio	LMP	Resultado Obtido	Avaliação
	Cr	Cr	
Lixiviação (mg.kg ⁻¹)	100,0	1,99	Classe II
Solubilização (mg.kg ⁻¹)	0,2	0,40	Classe II A
CORPO DE PROVA E (4 dias e 12,5% de resíduo sólido sintético)			
Ensaio	Parâmetro	Resultado Obtido	Avaliação
RC (MPa)	≥ 1	17,27*	Aprovado
CAA (%)	≤ 40	17,32*	Aprovado
U/S (%)	≤ 15	10,52*	Aprovado
Ensaio	LMP	Resultado Obtido	Avaliação
	Cr	Cr	
Lixiviação (mg.kg ⁻¹)	100,0	2,26	Classe II
Solubilização (mg.kg ⁻¹)	0,2	1,12	Classe II A

*valores médios dos pontos centrais

4.6.1 Critério de Avaliação: Integridade/Durabilidade

A TAB. 35 mostra que o corpo de prova A (1 dias e 5% de RSS), B (7 dias e 5% de RSS), C (1 dias e 20% de RSS), D (7 dias e 20% de RSS) e E (4 dias e 12,5% de RSS) foram aprovados nos ensaios de resistência à compressão, capacidade de absorção de água e umidificação/secagem, portanto, apresentam integridade e durabilidade.

O corpo de prova A obteve uma resistência à compressão 16 vezes maior que o limite máximo permissível, segundo o Protocolo de avaliação, 22 vezes maior para o corpo de prova B, 12 vezes maior para o corpo de prova C e 17 vezes maior para os corpos de prova D e E. Os corpos de prova foram avaliados como aprovados nos ensaios de resistência à compressão.

A maior resistência obtida nesse trabalho foi para um tempo de 7 dias e 5% de RSS com resistência à compressão igual a 22,27 MPa, sendo maior que o valor obtido por ROJAS et al. (2009) com tempo de 7 dias e 6% de borra (2,92 MPa) e GUIMARÃES (2008) com resistência à compressão igual a 1,9824 MPa. Vale salientar que ROJAS et al. (2009) trabalharam com cimento Portland CPV ARI, e GUIMARÃES (2008) utilizou argamassa de cimento (composição de cimento + areia), enquanto, que no trabalho realizado utilizou o cimento CII F32.

Os corpos de prova ficaram todos abaixo do limite máximo permissível (LMP) de 40% para capacidade de absorção de água. Os corpos de prova apresentaram as seguintes reduções em relação ao LMP:

- Corpo de prova A = 16,99% (redução de 57,53%);
- Corpo de prova B = 15,51% (redução de 61,23%);
- Corpo de prova C = 18,43% (redução de 53,93%);
- Corpo de prova D = 17,17% (redução de 57,08%);
- Corpo de prova E = 17,32% (redução de 56,70%).

Trabalho realizado por GUIMARÃES (2008), com tempo de 7 dias e 5% de lodo, obteve um capacidade de absorção de água 20,71%, um pouco acima do valor obtido no presente trabalho para o mesmo tempo e percentagem de resíduo que foi de 15,51%.

Para umidificação/secagem os resultados obtidos ficaram todos abaixo do limite máximo permissível que é 15%, sendo avaliados como aprovados, obtendo as seguintes reduções em relação ao LMP:

- Corpo de prova A = 9,50% (redução de 36,67%);
- Corpo de prova B = 8,21% (redução de 45,27%);
- Corpo de prova C = 11,71% (redução de 21,93%);
- Corpo de prova D = 9,76% (redução de 34,93%);
- Corpo de prova E = 10,52% (redução de 29,87%)

O valor obtido para um tempo de 7 dias e 5% de RSS foi igual a 8,21% na U/S, ficando um pouco acima, comparando com o resultado de GUIMARÃES (2008) com 7,88%, utilizando o mesmo tempo e percentagem de resíduo.

4.6.2 Critério de Avaliação: Imobilização dos contaminantes

A TAB. 34 mostra que os corpos de prova A, B, C, D e E, após o tratamento foram avaliados no ensaio de lixiviação como material não perigoso – Classe II (Antes do tratamento foi classificado como um material perigoso Classe I e, após, a estabilização por solidificação passou a ser uma material não perigoso Classe II).

Todos os corpos de prova ficaram abaixo do limite máximo permissível para a lixiviação do cromo. O corpo de prova A ficou abaixo do limite, em aproximadamente 50 vezes, o corpo de prova B (42 vezes), o corpo de prova C (46 vezes), o corpo de prova D (50 vezes) e E com 44 vezes a menos que o limite máximo permissível.

Através da análise de solubilização o material poderá ser classificado como Classe IIA ou Classe – IIB. Observa-se na TAB. 34 que os resultados obtidos para a solubilização ficaram acima do limite máximo permissível, sendo classificado como uma material Classe IIA (não inerte), com características de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

GUIMARÃES (2008) caracterizou o lodo da estação de tratamento de efluentes e obteve uma concentração de cromo igual a $4.461,63 \text{ mg.kg}^{-1}$. Com tempo de 7 dias e 5% de resíduo, o material lixiviou $558,28 \text{ mg.kg}^{-1}$ de cromo com redução de 8 vezes na sua concentração inicial, cerca de 87,49%, ficando muito acima do valor obtido no presente trabalho com mesmo tempo e percentagem com valor igual a $2,40 \text{ mg.kg}^{-1}$ do resíduo tratado, com uma concentração de resíduo sólido sintético contendo cromo de 1.462 mg.kg^{-1} (produzido), que após o tratamento houve uma diminuição na sua concentração igual a 610 vezes menor com mesmo aglomerante usado pelo autor.

BRITO e SOARES (2009) produziram um RSS, obtiveram uma concentração de 125,88 mg.kg⁻¹ para o cádmio, 92,88 mg.kg⁻¹ para o chumbo e 79,45 mg.kg⁻¹ para o cobre. Após o tratamento de 28 dias e 40% de resíduo encontraram 3,78 mg.kg⁻¹ para o cádmio com redução de 21 vezes, de 4,99 mg.kg⁻¹ para chumbo com redução de 20 vezes e de 8,321 mg.kg⁻¹ para o cobre com redução de 12 vezes na sua concentração.

4.6.3 Determinação da eficiência de retenção dos contaminantes

Nesta parte será determinada a eficiência de retenção do metal pesado cromo para lixiviação e solubilização, calculada a partir da expressão 14 (ver Capítulo 3).

Na TAB. 365 está apresentada a eficiência de retenção do metal pesado cromo em relação a sua lixiviação para os tratamentos A, B, C, D e E.

TABELA 36 – Eficiência de retenção de metais pesados para lixiviação

CP	Massa de aglomerante (g)	Massa de resíduo (g)	Con. do lixiviado tratado [y] (mg.kg ⁻¹)	Con. do lixiviado bruto [z] (mg.kg ⁻¹)	Eficiência de retenção (%)
A	330	16,50	1,99	1.462,00	99,86
B	330	16,50	2,40	1.462,00	99,83
C	290	58,00	2,19	1.462,00	99,82
D	290	58,00	1,99	1.462,00	99,84
E	310	38,75	2,26	1.462,00	99,83

A concentração do metal pesado no lixiviado do resíduo bruto foi bastante elevada, apresentando alto teor de contaminante igual a 4.461,63 mg.kg⁻¹ de cromo.

Analisando a eficiência de retenção, a concentração no lixiviado dos corpos de prova A (1 dias e 5% de resíduo sólido sintético), B (7 dias e 5% de resíduo sólido sintético), C (1 dias e 20% de resíduo sólido sintético), D (7 dias e 20% de resíduo sólido sintético) e E (4 dias e 12,5% de resíduo sólido sintético), constatou-se que eles apresentaram grande redução na sua concentração. A maior retenção foi para o corpo de prova A com uma percentagem de retenção de 99,86% e a menor retenção para o corpo de prova C foi 99,82%, mostrando uma eficiência de retenção próximo de 100%.

Dessa forma pode-se observar a grande eficiência do processo de E/S em aprisionar o metal cromo nos corpos de prova, impedimento que o mesmo seja lixiviado para o meio ambiente.

GUIMARÃES (2008) calculou a eficiência de retenção do cromo no lixiviado com tempo de 7 dias e 5% de lodo, obteve como resultado uma eficiência de 86,83%, valor abaixo obtido no presente trabalho que foi 99,83%, com mesmo tempo de 7 dias e percentagem de resíduo de 5%, aumento de aproximadamente 15%.

A TAB. 37 apresenta a eficiência de retenção do metal pesado cromo para solubilização dos tratamentos A, B, C, D e E.

TABELA 37 – Eficiência de retenção de metais pesados para solubilização

CP	Massa de aglomerante (g)	Massa de resíduo (g)	Con. do lixiviado tratado [y] (mg.kg ⁻¹)	Con. do lixiviado bruto [z] (mg.kg ⁻¹)	Eficiência de retenção (%)
A	330	16,50	0,44	1.462,00	99,97
B	330	16,50	0,40	1.462,00	99,97
C	290	58,00	0,44	1.462,00	99,96
D	290	58,00	0,40	1.462,00	99,97
E	310	38,75	1,12	1.462,00	99,91

A concentração do metal cromo no solubilizado, para os corpos de prova A (1 dias e 5% de resíduo sólido sintético), B (7 dias e 5% de resíduo sólido sintético), C (1 dias e 20% de resíduo sólido sintético), D (7 dias e 20% de resíduo sólido sintético) e E (4 dias e 12,5% de resíduo sólido sintético), tiveram alta eficiência de retenção do metal na matriz sólida. Com maior eficiência para o corpo de prova A, B e C de 99,97% e, menor para o corpo de prova E de 99,91%, valores obtidos ficaram próximo de 100% de eficiência, observa-se pelos resultados obtidos, que o processo de E/S, tem grande capacidade de fixar o metal na matriz sólida e, com alto poder de retenção, no extrato solubilizado com água.

GUIMARÃES (2008) obteve uma retenção do metal cromo no solubilizado de 91,46% com tempo de 7 dias e 5% de lodo, ficando abaixo do valor obtido no presente trabalho igual a 99,97%, aumento de 9,30%.

4.6.4 Rotas de Destinação dos Materiais

Com base nos resultados dos critérios de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes, o Protocolo de Avaliação de Material E/S propõe várias rotas de destinação e/ou disposição dos materiais. A FIG. 8 mostra as sequências de avaliação dos corpos de prova A, B, C, D e E.

Baseado no desempenho dos ensaios propostos o material E/S pode ser utilizado, armazenado ou disposto em uma das cinco rotas de destinação assim denominadas: utilização sem restrição (I), utilização com restrição (II), disposição em aterro de resíduos perigosos (III), utilização controlada (IV) e disposição em aterro de resíduo não perigoso (V).

Para ser aprovado no critério de integridade/durabilidade o material deve ser aprovado em todos os ensaios deste critério: resistência à compressão, absorção de água e umidificação/secagem. Do mesmo modo, para ser aprovado no critério de imobilização dos contaminantes o material deve ser aprovado nos ensaios de lixiviação e solubilização (BRITO, 2007).

A FIG. 8 mostra a sequência dos corpos de prova, desde a produção do RSS o uso do tratamento, através do processo de E/S. A avaliação e a rota de destino dos materiais.

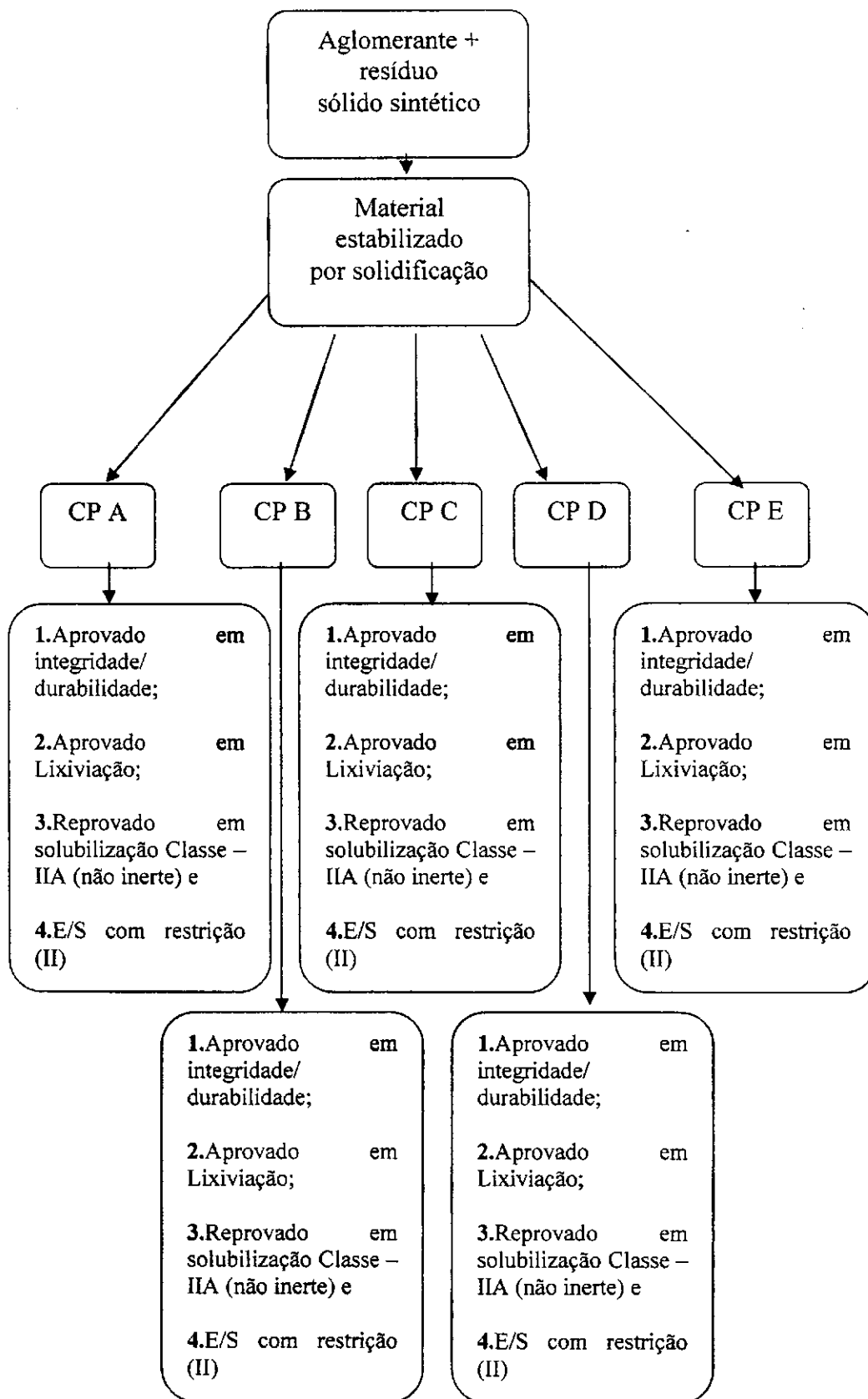


FIGURA 8 – Sequência de avaliação para os corpos de prova A, B, C, D e E.

Observa-se na FIG. 8 que através das rotas de destino os corpos de prova A, B, C, D e, foram aprovados nos critérios de integridade/durabilidade (resistência à compressão, capacidade de absorção de água e umidificação/secagem).

Para a imobilização dos contaminantes o material foi aprovado na ensaio de lixiviação, sendo classificado como um material não perigoso (Classe II). Por outro lado no ensaio de solubilização o material foi reprovado, sendo classificado como Classe IIA (não inerte), que segundo o protocolo de avaliação o material foi classificado como estabilizado por solidificação com restrição (II), devendo ser armazenado conforme a ABNT 11.174 (ABNT, 1990) ou utilizado com restrição (BRITO, 2007).

Na TAB. 38 são apresentadas às diversas formas de utilização do material estabilizado por solidificação em função dos parâmetros.

TABELA 38 – Utilização do material estabilizado por solidificação

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)

Para os resultados encontrados em relação a resistência à compressão dos corpos de prova e utilização desse material em função dos parâmetros de aceitação, pode-se concluir que:

i) corpo de prova A com resistência à compressão de 16,65 MPa, pode ser usado como material termoplástico (polietileno); ii) corpo de prova B com resistência de 22,27 MPa, pode ser usado como material termofixo; iii) corpo de prova C com resistência igual a 12,5 MPa, pode ser usado como bloco vazado em concreto comum e material de cobertura em pavimentação; iv) corpo de prova D com resistência 17,12 MPa, pode ser usado como material termofixo e v) corpo de prova E com resistência de 17,27 MPa, pode ser usado como material termofixo. Vale destacar que o uso dependerá de uma avaliação específica de cada setor que utilizar ou reaproveitar o material estabilizado por solidificação.

Capítulo 5

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Com base na análise dos resultados deste trabalho, pode-se concluir que:

- A integridade/durabilidade do material depende significativamente da porcentagem do resíduo sólido sintético. Quanto menor essa porcentagem, maior a integridade/durabilidade do material;
- O modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais para os ensaios de integridade/durabilidade foi o linear. Os fatores tempo e porcentagem de resíduo sólido sintético, influenciaram nos resultados;
- Os ensaios de integridade/durabilidade (resistência à compressão, capacidade de absorção de água e umidificação/secagem), foram avaliados como aprovados;
- No ensaio de lixiviação foi possível verificar, que após o tratamento utilizado para estabilizar e solidificar o resíduo sólido sintético, o material passou de perigoso (Classe I), para não perigoso (Classe II) e, através do ensaio de solubilização foi possível avaliar os tratamentos como material Classe IIA (não inerte);
- Nos ensaios de imobilização dos contaminantes, os resultados mostraram que não houve efeito significativo dos tratamentos na lixiviação e solubilização. A faixa de tempo e porcentagem utilizadas neste trabalho não mostraram diferenças significativas na imobilização dos contaminantes;
- A eficiência de retenção do material estabilizado por solidificação, mostrou ser bastante significativo, com alta retenção do metal cromo na massa sólida do aglomerante;
- O material estabilizado por solidificação foi aprovado no ensaio de integridade/durabilidade e imobilização dos contaminantes, sendo classificado segundo o Protocolo de Avaliação como um material estabilizado por solidificação com restrição;
- Após o tratamento o material estabilizado por solidificação pode ser usado como material termoplástico, material termofixo, bloco vazado em concreto comum e

material de cobertura em pavimentação e seguiu a rota de material estabilizado por solidificação com restrição.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Quanto às recomendações, pode-se sugerir para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência de outros aglomerantes, como argila e hidróxido de cálcio, no processo de estabilização por solidificação;
- Avaliar o material em outras faixas (níveis) dos fatores tempo de cura e percentagem de resíduo sólido sintético;
- Avaliar a cura dos corpos de prova submersos em água, visando avaliar a influência do tipo de cura (água ou sem água) na resistência à compressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABETRE. Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos. **Faz análise do mercado de Resíduos Perigosos**, 2002. Disponível em: http://www.abetre.org.br/noticia_completa.asp?NOT_COD=373. Acesso em: 29 de junho de 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7215. **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1997.

_____. NBR 10.004. **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 10.005. **Resíduos sólidos – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 10.006. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: 2004.

_____. NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica**. 2005.

ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **Toxicological profile for chromium**. Syracuse: U. S. Department of Health & Human Services, 2000.

BACCAN, N. **Metais Pesados: Significado e Uso da Terminologia**. In: ANAIS IX ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONTAMINANTES INORGÂNICOS, IPEN, São Paulo, 2004.

BARBETTA, P.A.; REIS, M.M.; BORNIA, A.C. **Estatística para cursos de Engenharia e Informática**. Atlas, São Paulo, 2004, 410p.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de construção**, v.1. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

BOLLA, L.; GARIBOLDI, L.M.; GABRIELLI, M.; BALDO, D.; ROMANELLI, A.; TUBERTI, E.; MAGNANI, F. **Rinopatia da esposizione professionale a cromo nell'industria galvanica: aspetti citomorfologici**. Méd. Lavoro, v.81, p.390-398, 1990.

BRITO, A.L.F. **Protocolo de Avaliação de Materiais Resultantes da Estabilização por Solidificação de Resíduos**. 2007. 180 f. Tese (Doutorado - Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BRITO, A.L.F.; SOARES, S.R; **Avaliação da integridade e da retenção de metais pesados em materiais estabilizados por solidificação**, Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.14, n. 1, 2009.

BRITO, A.L.F. **Apostila de Gestão Ambiental**. 2009. Disponível em: http://www.labger.pro.br/attachments/File/Gest%C3%A3o%20Ambiental/Apostila%20Gest%C3%A3o%20Ambiental_EQ_EP_EA.pdf. Acesso em 15 de set. 2010.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 264, de 26 de agosto de 1999. Publicada no DOU nº 54, de 20 de março de 2000, Seção 1, páginas 80-83. Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos.

_____. RESOLUÇÃO CONAMA nº 313, de 29 de outubro de 2002 Publicada no DOU nº 226, de 22 de novembro de 2002, Seção 1, páginas 85-91. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais.

_____. RESOLUÇÃO nº 357, de 17 de março de 2005. Publicada no DOU nº 53, de 18 de março de 2005, Seção 1, páginas 58-63. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

_____. Resolução nº 397, de 3 de abril de 2008. Publicada no D.O.U. nº 66, de 7 de abril de 2008, Seção 1, páginas 68-69. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.

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

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Solidification Stabilization use at superfund sites**. EPA-542. Washington. 1991.

_____. **Solidification/Stabilization and its application to waste materials**. Technical Resource Document. EPA/513/R-93/012. 1993.

_____. **Treatment Technologies for Site Cleanup**: Annual Status Report, 10th edition. 2001.

GIANNETTI, B.F.; ALMEIDA, C.M.V.B; BONILLA, S.H.; VENDRAMETO, O. **Nosso Cromo de Cada Dia: Benefícios e Riscos**. Revista de Graduação da Engenharia Química, ANO IV N°8, São Paulo, Brasil, 2001. Disponível em: <<http://www.hottopos.com.br/regeq8/biaggio.htm>> Acesso em: 15 de set. 2010.

GUIMARÃES, D.L; **Tratamento de lodo primário de estação de tratamento de efluentes e aplicação de protocolo de avaliação**. 2008. 104 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Química/PPGEQ – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

HAIR Jr, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. **Análise multivariada de dados**. Trad. SANT' ANNA, A. S.; CHAVES NETO, A. 5ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593p.

HEREK, L.C.S; BERGAMASCO R; TAVARES, C.R.G., UEMURA, V.O; PANCOTTE, L.P; **Estudo da Solidificação/Estabilização do Lodo da Indústria Têxtil em Material Cerâmico**, v.10, n.4 - julho/agosto – 2005.

HILLERT, M. ICME (INTERNATIONAL COUNCIL ON METALS AND THE ENVIRONMENT). *Newsletter*, Vol. 5, No. 4. Ottawa, Canada. 1997.

LANGE, L.C.; SCHWABE, W.S.; HILLS, C.D. **A tecnologia da Solidificação/Estabilização Aplicada ao Tratamento de Resíduos Industriais**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. No 1, Jan/Mar e No 2-Abr./Jun 1998.

LIMA, E.H.; CRUZ, O.L.M.; SILVA, C.S.; GRASEL, S.S. **Chromium induced nasal lesions: why do they remain so common?** *Otolaryngol. Head Neck Surg*, v.115, n.2, p.175, 1996.

LORA, E.S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. Brasília, DF: ANEEL, 2000.

MARTINS, A.; MARCONDES, C.G.; MADI, F.; NEVES, I.F. AOKI, J.; TOKUDOME, N.; MERCADÉ, S.R. **Cimento: Treinamento de Mão de Obra na Construção Civil**. 33 p, 2008. Disponível em:

MAYERS, T.E; EAPPI, M.E. **Laboratory evaluation of stabilization/solidification technology for reducing the mobility of heavy metals in new Bedford harbor superfund site sediments stabilization of hazardous radioactive and mixed wastes**. Second edition. ASTM publication, Philadelphia, 304p. 1992.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências.

MINITAB INC. STATISTICAL SOFTWARE – Data Analysis Software. Version 15, 2006.

MINOCHA, A.K; JAIN, N; VERMA, C.L. **Effect of inorganic materials on the solidification of heavy metal sludge**: Cement and concrete research. *Science direct*, v. 33, p. 1695-1701, 2003.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 4a ed. Jonh Wiley e Sons, Inc. New York, 1996, 703p.

MONTGOMERY, D.C; RUNGER, G.C. **Estatística Aplicada e probabilidade para Engenheiros**. 2a Ed. LTC Editora. São Paulo, 2003, 463p.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de Cimento Portland: Cimento Portland**. 13 ed. rev. por PAULON, V. A. São Paulo – SP: Globo, 1998.

PIETROBON, C.L.R; ANDRADE, C.M.G; COLANZI, J; BARROS, I.B.B; BERGAMASCO, R; PIETROBON, C.E. **Lixiviação de contaminantes de compostos de lodo-cimento**: *Acta Scientiarum. Technology*. Maringá, v. 26, no. 1, p. 45-52, 2004.

PINTO, C.A. **Estabilização por solidificação em cimento do resíduo de curtume contendo cromo**. 2001. 90p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

PINTO, C.A.; HAMASSAKI, L.T.; DIAZ, F.R.V.; DWECK, J.; BÜCHLER, P.M; **Estudo da estabilização por solidificação em cimento do resíduo do curtimento do couro contendo cromo.** In: 14º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Natal, 2002.

PRIM, E.C.C.; CHERIAF, M. CASTILHO JR., B.; ROCHA, J.C.; LUZ, C.A. **VALORIZAÇÃO DO LODO DA INDÚSTRIA TÊXTIL COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL UTILIZANDO A TÉCNICA DE SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO.** In: CONGRESSO INTERRAMERICANO DE ENGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL AIDIS, 26., Guatemala de la Asunción. **Anais...**Guatemala de la Asunción: AIDIS, 2009. p.1-14.. Disponível em: <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/resisoli/peru/brares172.pdf>. Acesso: 15 de set. 2010.

ROJAS, J.W.J.; HEINECK, K.S; CONSOLI, N.C. **Resistência à compressão simples de um solo contaminado e cimentado.** Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.13, p.13-18, Maio, 2009.

SHI, C.; SPENCE, R. Designing of cement-based formula for solidification/stabilization of hazardous, radioactive and mixed wastes. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology** 34, 391-417 (2004).

SILVA, C.S.; PEDROZO, M.F.M. **Ecotoxicologia de Cromo e seus Compostos.** Salvador: CRA, 2001. 100 p. (Cadernos de Referência Ambiental, v.5).

SPENCE, R.D. (ed.) **Chemistry and microstructure of solidified waste forms.** Boca Raton: Lewis Publishers, 1992.

SPENCE, R.D; SHI, C. **Stabilization and solidification of hazardous, radioactive and mixed wastes.** Boca Raton, Fl. Ed. CRC Press. 2005. 2p.

STERGEMANN, J.A.; BUENFELD, N.R. Prediction of leachate pH for cement paste containing pure metal compounds. **Elsevier, Journal of Hazardous Materials.** Amsterdam, v. B90. p. 169-188. 2002.

TARTUCE, R. GIOVANNETTI, E. **Princípios básicos sobre concreto de cimento Portland.** São Paulo: Pini/ibracon, 1990.

TENÓRIO, J.A.S; ESPINOSA, D.C.R. Capítulo 5 in **Curso de Gestão Ambiental.** 1 ed. Barueri, SP: Manole, 2004. (Coleção Ambiental 1). "Universidade de São Paulo, Faculdade de São Paulo, Núcleo de Informações em Saúde Ambiental".

TOCCHETTO, M. **TOXICOLOGIA E SEGURANÇA DE LABORATÓRIO.** Cursos de Química Industrial, Licenciatura e Bacharelado – UFSM. Profa. Dra. Marta Tocchetto. 2006. Disponível em: <http://marta.tocchetto.com/site/?q=system/files/Toxicologia+-+Conceitos.pdf>. Acesso: 15 de set. 2010.

WASTEWATER TECHNOLOGY CENTER - *WTC-EC-EPS-3/HÁ/9.* **Proposed evaluation protocol for cement-based stabilization/solidification wastes.** Canada: Environment Canada. 1991.

FOLHA DE ERRATA

- 1) Página 15 → Último Parágrafo → Segunda Linha (2ª linha) → onde lê-se: em que deverá ser classificado como perigoso – Classe I → deverá ser substituída por: em que foi classificado como perigoso – Classe I. Na quinta linha (5ª Linha) → onde lê-se: Na terceira etapa será determinado → deverá ser substituído por: Na terceira etapa foi determinada;
- 2) Página 44 → Primeiro Parágrafo (1º Parágrafo) → Segunda Linha (2ª linha) → onde lê-se: localizada → deverá ser substituído por: localizado;
- 3) Página 45 → Primeiro Parágrafo (1º Parágrafo) → Primeira Linha (1ª linha) → onde lê-se: foi produzido → deverá ser substituído por: foi produzida;
- 4) Página 46 → Ítem 3.3.1 → Segunda Linha (2ª linha) → onde lê-se terá → deverá ser substituído por: teve;
- 5) Página 47 → Ítem 3.3.2 → Segunda linha (2ª Linha) e Terceira Linha (3ª linha) → onde lê-se: será → deverá ser substituído por: foi;
- 6) Página 59 → Ítem 4.1 → terceiro Parágrafo → onde lê-se sendo, portanto, possível de tratamento, deverá ser substituído por: sendo, portanto, passível de tratamento;
- 7) Página 60 → Ítem 4.2.1 → Segundo Parágrafo (2º Parágrafo) → Quinta linha (5ª linha) → onde lê-se: o modelo poderá ser linear → deverá ser retirado;
- 8) Página 63 → Primeiro Parágrafo (1º Parágrafo) → Sexta linha (6ª linha) → onde lê-se o modelo que descreve os dados será o modelo linear → deverá ser substituído por: o modelo que descreve os dados foi o modelo linear.
- 9) Página 68 → Sexto Parágrafo (6º Parágrafo) → Primeira Linha (1ª linha) → onde lê-se estabilização por solidificação → deverá colocar espaço em: estabilização por solidificação;
- 10) Página 81 → Ítem 4.6.3 → Primeira Linha (1ª linha) → onde lê-se: Nesta parte será determinada → deverá ser substituído por: Nesta parte foi determinada.