**ESTUDO PARA A REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO CONSTITUÍDO PELAS
AREIAS DE FUNDIÇÃO AGLOMERADAS COM ARGILA, ATRAVÉS DA TÉCNICA
DE SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO EM MATRIZES DE CIMENTO
PORTLAND, PARA APLICAÇÃO NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Javier Mazariegos Pablos

Tese apresentada ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo

Orientador: Prof. Titular Eduvaldo Paulo Sichieri

São Carlos, 2008

Dedicatória

À minha esposa Elissa Laura Melchiori

À minha filha Maria Melchiori Mazariegos

Pelo carinho e compreensão durante todos estes anos.

À minha mãe Maria Angeles Pablos Garcia (em memória)

Ao meu irmão Juan Carlos Mazariegos Pablos (em memória)

Agradecimentos

Ao Laboratório de Construção Civil do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, em nome dos técnicos: Sérgio Aparecido Trevelin, Paulo Wanderley Pratavieira e Paulo César Albertini.

Ao Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, em nome do técnico Júlio César Trofino.

Ao Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, em nome do técnico Antonio Carlos Gigante.

Ao Laboratório de Química Ambiental do Departamento de Química e Física Molecular do Instituto de Química de São Carlos – USP, em nome da Prof^a. Dr^a. Maria Olímpia de Oliveira Rezende.

À Tecumseh do Brasil Ltda, em nome do Gerente do Setor de Fundição, Sr. Valter Bizetto, assim como do Chefe do Setor de Obras Civas, Sr. Marcelo Ciabi.

Ao Orientador desta pesquisa, Prof. Titular Eduvaldo Paulo Sichieri, pelo apoio constante e pela eterna amizade.

A todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento e concretização deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Tabelas.....	IV
Lista de Figuras.....	VII
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Justificativa.....	1
1.2. Avaliação Nacional.....	3
1.3. Avaliação Regional.....	4
1.4. Objetivo Geral.....	5
1.5. Objetivos Específicos.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Resíduos Sólidos.....	6
2.2. Areias de Fundição Aglomeradas com Argila.....	8
2.3. Solidificação/Estabilização de Resíduos Sólidos.....	12
2.3.1. Definições.....	12
2.3.2. Breve Histórico.....	14
2.3.3. Técnicas Desenvolvidas.....	16
2.3.3.1. Técnica baseada em materiais pozolânicos.....	16
2.3.3.2. Técnica baseada em polímeros orgânicos.....	17
2.3.3.3. Técnica baseada em invólucros.....	18
2.3.3.4. Técnica de vitrificação.....	18
2.3.3.5. Técnica de auto-solidificação.....	19
2.3.3.6. Técnica baseada em argilas.....	20
2.3.3.7. Técnica baseada em cimento Portland.....	21
2.3.4. Trabalhos Desenvolvidos.....	25
2.4. Argamassas de Cimento Portland.....	30
2.4.1. Cimento Portland.....	32

2.4.2. Agregados.....	38
2.4.2.1. Composição granulométrica.....	40
2.4.2.2. Substâncias deletérias.....	41
2.4.3. Qualidade da Água de Amassamento.....	43
2.5. Sílica Ativa.....	45
 3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1. Introdução.....	49
3.1.1. Avaliação Mecânica.....	51
3.1.2. Avaliação Física.....	51
3.1.3. Avaliação Química.....	57
3.2. Estrutura Metodológica.....	59
3.3. Resíduo Sólido.....	60
3.3.1. Fonte Geradora.....	60
3.3.2. Caracterização do resíduo sólido.....	63
3.3.3. Caracterização do resíduo como agregado.....	70
3.4. Cimento Portland.....	78
3.5. Sílica Ativa.....	81
3.6. Argila.....	82
3.7. Solidificação em Matrizes de Cimento Portland.....	83
3.7.1. Composições Preliminares.....	83
3.7.2. Resultados Preliminares.....	86
3.7.3. Análise dos Resultados Preliminares.....	89
3.8. Composições com Adições Minerais.....	90
3.9. Fabricação e avaliação dos tijolos maciços.....	93
 4. RESULTADOS.....	95
4.1. Resistência à Compressão das Matrizes com Adições Minerais.....	95
4.2. Absorção de Água das Matrizes com Adições Minerais.....	97
4.3. Permeabilidade das Matrizes com Adições Minerais.....	99
4.4. Solubilização das Matrizes com Adições Minerais.....	102

4.5. Eficiência de Fixação dos Metais nas Matrizes Solidificadas.....	104
4.6. Resistência à Compressão e Absorção de Água dos Tijolos Maciços.....	106
4.7. Solubilização dos Tijolos Maciços.....	108
 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	 109
 6. CONCLUSÕES.....	 112
 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 115
 ANEXO A.....	 120
 ANEXO B.....	 123
 ANEXO C.....	 130

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Exemplos de aplicação da técnica S/S em matrizes de cimento.....	23
Tabela 2.2 – Lixiviação matrizes solidificadas (1:3), 28 dias.....	26
Tabela 2.3 – Lixiviação matrizes solidificadas (1:5), 28 dias.....	26
Tabela 2.4 – Lixiviação matrizes solidificadas (1:7), 28 dias.....	27
Tabela 2.5 – Lixiviação matrizes solidificadas (1:3), 90 dias.....	28
Tabela 2.6 – Lixiviação matrizes solidificadas (1:5), 90 dias.....	28
Tabela 2.7 – Compostos principais do cimento Portland.....	35
Tabela 3.1 – Análise química da argila.....	61
Tabela 3.2 – Composição das areia de fundição.....	61
Tabela 3.3 – Análise do extrato solubilizado (ABNT).....	66
Tabela 3.4 – Análise do extrato lixiviado (ABNT).....	67
Tabela 3.5 – Análise do extrato lixiviado (CETESB).....	69
Tabela 3.6 – Análise do extrato lixiviado neutro (CETESB).....	70
Tabela 3.7 – Teor de materiais pulverulentos.....	72
Tabela 3.8 – Teor de argila em torrões e materiais friáveis.....	73
Tabela 3.9 – Massa específica do resíduo.....	76
Tabela 3.10 – Massa unitária do resíduo no estado solto.....	77
Tabela 3.11 – Teor de umidade total.....	77
Tabela 3.12 – Propriedades químicas do clínquer.....	79
Tabela 3.13 – Composição do cimento.....	80
Tabela 3.14 – Propriedades físicas do cimento CP II E-32.....	80
Tabela 3.15 – Composição potencial do cimento.....	80
Tabela 3.16 – Propriedades químicas da sílica ativa.....	81
Tabela 3.17 – Propriedades físicas da sílica ativa.....	82
Tabela 3.18 – Composições de referência.....	84
Tabela 3.19 – Composições com cimento e resíduo.....	85
Tabela 3.20 – Resistência à compressão e absorção de água das Composições CA1.....	86

Tabela 3.21 – Resistência à compressão e absorção de água das Composições CA3.....	86
Tabela 3.22 – Resistência à compressão e absorção de água das Composições CA5.....	86
Tabela 3.23 – Resistência à compressão e absorção de água das Composições CR1.....	86
Tabela 3.24 – Resistência à compressão e absorção de água das Composições CR3.....	86
Tabela 3.25 – Resistência à compressão e absorção de água das Composições CR5.....	87
Tabela 3.26 – Análise do extrato solubilizado das composições CR1.....	88
Tabela 3.27 – Análise do extrato solubilizado das composições CR3.....	88
Tabela 3.28 – Análise do extrato solubilizado das composições CR5.....	88
Tabela 3.29 – Composições com cimento, resíduo e bentonita.....	90
Tabela 3.30 – Composições com cimento, resíduo e sílica.....	90
Tabela 3.31 – Composições com cimento, resíduo, bentonita e sílica.....	91
Tabela 4.1 - Resistência à compressão das composições CRB1.....	95
Tabela 4.2 - Resistência à compressão das composições CRB3.....	95
Tabela 4.3 - Resistência à compressão das composições CRS1.....	95
Tabela 4.4 - Resistência à compressão das composições CRS3.....	95
Tabela 4.5 - Resistência à compressão das composições CRBS1.....	96
Tabela 4.6 - Resistência à compressão das composições CRBS3.....	96
Tabela 4.7 - Absorção de água das composições CRB1.....	97
Tabela 4.8 - Absorção de água das composições CRB3.....	97
Tabela 4.9 - Absorção de água das composições CRS1.....	97
Tabela 4.10 - Absorção de água das composições CRS3.....	97
Tabela 4.11 - Absorção de água das composições CRBS1.....	97
Tabela 4.12 - Absorção de água das composições CRBS3.....	97
Tabela 4.13 – Permeabilidade ao ar das matrizes.....	101
Tabela 4.14 – Análise do extrato solubilizado das composições CRB1...	102
Tabela 4.15 – Análise do extrato solubilizado das composições CRB3...	102
Tabela 4.16 – Análise do extrato solubilizado das composições CRS1...	103
Tabela 4.17 – Análise do extrato solubilizado das composições CRS3...	103
Tabela 4.18 – Análise do extrato solubilizado das composições CRBS1.	103
Tabela 4.19 – Análise do extrato solubilizado das composições CRBS3.	103

Tabela 4.20 – Eficiência de fixação das matrizes CRB1.....	104
Tabela 4.21 – Eficiência de fixação das matrizes CRB3.....	105
Tabela 4.22 – Eficiência de fixação das matrizes CRS1.....	105
Tabela 4.23 – Eficiência de fixação das matrizes CRS3.....	105
Tabela 4.24 – Eficiência de fixação das matrizes CRBS1.....	105
Tabela 4.25 – Eficiência de fixação das matrizes CRBS3.....	105
Tabela 4.26 – Resistência à compressão dos tijolos CRS1 (28 dias)....	107
Tabela 4.27 – Absorção de água dos tijolos CRS1 (28 dias).....	107
Tabela 4.28 – Resistência à compressão dos tijolos CRS3 (28 dias)....	107
Tabela 4.29 – Absorção de água dos tijolos CRS3 (28 dias).....	108
Tabela 4.30 – Análise do extrato solubilizado dos tijolos CRS1.....	108
Tabela 4.31 – Análise do extrato solubilizado dos tijolos CRS3.....	108

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Difratoograma da matriz solidificada (1:3), 28 dias.....	29
Figura 2.2 – Difratoograma da matriz solidificada (1:3), 28 dias.....	29
Figura 3.1 – Equipamento para a determinação da permeabilidade ao ar.....	52
Figura 3.2 – Esquema do equipamento para a determinação da permeabilidade.....	52
Figura 3.3 – Fluxograma simplificado do processo de fundição e de geração do resíduo.....	62
Figura 3.4 – Equipamento para obtenção do extrato solubilizado.....	65
Figura 3.5 – Equipamento para obtenção do extrato lixiviado.....	65
Figura 3.6 – Resistência à compressão das composições CA.....	87
Figura 3.7 – Resistência à compressão das composições CR.....	87
Figura 3.8 – Resistência à compressão das composições CAxCR.....	88
Figura 3.9 – Fabricação dos tijolos em prensa hidráulica.....	94
Figura 3.10 – Tijolos fabricados com a composição CRS3.....	94
Figura 4.1 – Resistência à compressão das composições com relação cimento/resíduo de 1:1.....	96
Figura 4.2 – Resistência à compressão das composições com relação cimento/resíduo de 1:3.....	97
Figura 4.3 – Absorção de água das composições com relação cimento/resíduo de 1:1.....	99
Figura 4.4 – Absorção de água das composições com relação cimento/resíduo de 1:3.....	99
Figura 4.5 – Secagem dos corpos-de-prova em sílica-gel.....	100
Figura 4.6 – Permeabilidade Darciana das matrizes.....	101
Figura 4.7 – Permeabilidade não-Darciana das matrizes.....	101
Figura 4.8 – Exemplar preparado para o ensaio de resistência à compressão.....	106
Figura 4.9 – Execução do ensaio de resistência à compressão.....	106

RESUMO

MAZARIEGOS PABLOS, JAVIER **Estudo para a reutilização do resíduo sólido constituído pelas areias de fundição aglomeradas com argila, através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland, para aplicação no setor da construção civil.** 2008. Tese Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

A presente pesquisa realizou um estudo que investiga a viabilidade técnica para a reciclagem do resíduo sólido gerado pelo descarte das areias de fundição aglomeradas com argila, para aplicação no setor da construção civil. Para isso, o trabalho estabelece uma metodologia, a qual avalia a estabilização do resíduo em matrizes solidificadas de cimento Portland, melhoradas através de adições de argila bentonita sódica e/ou sílica ativa. A estabilização do resíduo foi verificada através de ensaio de solubilização, o qual submete as matrizes solidificadas a contatos dinâmico e estático com água destilada. Os desempenhos mecânico e físico das matrizes foram avaliados em ensaios de resistência à compressão, absorção de água e permeabilidade ao ar. Os resultados obtidos demonstram que, tanto a bentonita sódica, quanto a sílica ativa contribuem para o aumento da eficiência de fixação dos metais Al, Fe e Cr por parte das matrizes de cimento Portland. As composições que obtiveram os melhores desempenhos mecânico, físico e químico foram utilizadas na confecção de tijolos maciços, visando aplicação na execução de alvenarias. Para a moldagem dos tijolos foi empregada uma prensa hidráulica, o que possibilitou manter a regularidade dimensional das faces. Ao mesmo tempo, o formato dos tijolos foi concebido com design diferenciado, proporcionando modulação e encaixes que podem reduzir significativamente o consumo da argamassa de assentamento. Os tijolos foram submetidos aos ensaios de solubilização, resistência à compressão e absorção de água, apresentando resultados satisfatórios e comprovando a viabilidade técnica para aplicação na execução de alvenarias.

Palavras-chave: resíduos sólidos, areia de fundição, solidificação/estabilização, reutilização.

ABSTRACT

MAZARIEGOS PABLOS, JAVIER **Study to reuse a solid waste generated by foundry sands bonded with clay, through solidification/stabilization in Portland cement matrices technic, for implementation in the construction industry.** 2008. Tese Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

In this research, a study that investigates the technical feasibility for the recycling of solid waste generated by the disposal of the foundry sands bonded with clay, for implementation in the construction industry, was conducted. For this reason, the work establishes a method, which assesses the stabilization of waste in solidified matrices of Portland cement, improved by the additions of sodium bentonite clay and/or silica fume. The stabilization of the waste was verified by solubilization test, which puts the solidified matrices in static and dynamic contacts with distilled water. The mechanical and physical performances of the matrices were evaluated in tests of resistance to compression, absorption of water and air permeability. The results show that both the sodium bentonite, and the active silica contribute to increase the fixation efficiency of the metals Al, Fe and Cr by the matrices of Portland cement. The compositions that have the best mechanical, physical and chemical performance were used in the manufacture of massive bricks, seeking their use in the implementation of masonry. For the molding of bricks a hydraulic press was used, which allowed to keep the dimensional regularity of the faces. At the same time, the format of the bricks was designed with different shapes, providing modulation and fitting that can significantly reduce the consumption of settlement mortar. The bricks were subjected to tests of solubilization, resistance to compression and absorption of water, showing satisfactory results that confirm the technical feasibility for being used in the implementation of masonry.

Key words: solid wastes, foundry sands, solidification/stabilization, reuse.

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

Entre todos os problemas que a humanidade enfrenta, um dos principais é a necessidade de minimizar os efeitos da degradação ambiental e social. Isso é possível via desenvolvimento e aplicação de pesquisas científicas e tecnológicas, que visem encontrar soluções para os problemas gerados pelo progresso e que consigam repercussões positivas para o meio ambiente e para o aprimoramento da cidadania, no sentido de obter uma melhor qualidade de vida para as próximas gerações. Na verdade, todos são a favor de melhorar a qualidade do meio ambiente, desde que não tenham de deixar de poluí-lo.

Dentro desse contexto, uma das questões com fundamental importância para o ser humano é a necessidade de reaproveitar, ou reciclar o lixo, os rejeitos e os resíduos por ele gerados, como forma de recuperar matéria e energia, visando a preservação de recursos naturais, uma menor degradação do meio ambiente e uma melhoria nas condições de vida das comunidades.

As indústrias, em geral, são consideradas como grandes geradoras de efeitos nocivos ao meio ambiente, pela própria transformação dos recursos naturais em bens de consumo. Dessa forma, esse processamento de materiais culmina com a produção de grande quantidade de substâncias, algumas agressivas ao homem e ao meio, as quais, não têm aplicabilidade imediata, resultando em uma interferência em todo o processo de equilíbrio dos ecossistemas. Muitos desses resíduos

apresentam-se na forma sólida, outros na forma de partículas em suspensão, afetando locais por vezes distantes do local de sua geração.

As indústrias siderúrgicas, em geral, são consideradas como empresas que produzem grandes efeitos nocivos ao meio ambiente, tanto pela utilização de grande quantidade de recursos naturais, quanto devido à geração de alto volume de substâncias estranhas ao meio. Particularmente, as indústrias de fundição geram vários tipos de resíduos, entre eles um tipo de resíduo sólido proveniente do descarte das denominadas “areias de fundição aglomeradas com argila”, objeto de estudo na presente pesquisa.

A presente pesquisa estabelece a hipótese de possibilidade de reciclagem do resíduo sólido industrial em questão, para a utilização na produção de tijolos maciços, os quais seriam aplicados na execução de alvenarias.

O resíduo é classificado como “não perigoso” e “não inerte”, pois alguns metais (Fe, Al e Cr) são solubilizados em concentrações excessivas. A pesquisa estudou a viabilidade técnica para a reciclagem do resíduo, através da aplicação do processo de estabilização por solidificação em matrizes de cimento Portland, estas melhoradas com adições minerais, sendo que as composições, obtidas neste processo, que apresentaram o melhor desempenho foram aplicadas na fabricação de tijolos maciços.

1.2. AVALIAÇÃO NACIONAL

Pelas leis internacionais e, inclusive, as brasileiras, o manejo, o tratamento e a disposição final dos resíduos sólidos industriais é uma responsabilidade das fontes geradoras. No entanto, no caso brasileiro, o destino final destes resíduos é uma incógnita, observando-se uma tendência em manter um nível mínimo de informações a respeito. Diariamente eles são dispostos a céu aberto, geralmente em locais não apropriados, provocando poluição do ar, do solo e dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, além de constituírem-se em um grande desperdício de matéria e energia.

Considerando-se a diversidade e o porte do parque industrial brasileiro, pode-se afirmar que a quantidade e a qualidade dos resíduos sólidos gerados assumem uma importância considerável no processo de degradação do meio ambiente e no de exploração de certos recursos naturais. A questão do manejo, tratamento e destino final dos resíduos sólidos industriais no Brasil, só não é mais crítica pelo desconhecimento da realidade, provocando equívocos, ou remetendo a tratamento de forma parcial do problema.

Atualmente, está em andamento um processo de inventário nacional de resíduos industriais, sendo que alguns Estados do Brasil já iniciaram o levantamento de dados, enquanto outros não possuem projeto para esse fim. Segundo a Abetre – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento, Recuperação e Disposição de Resíduos Especiais (IETEC, 2006)³⁸ são gerados anualmente no Brasil cerca de 2,9 milhões de

toneladas de resíduos sólidos industriais, dos quais apenas 22% recebem tratamento adequado.

Para as indústrias brasileiras, gerenciar os resíduos transformou-se em um dos principais desafios enfrentados. É necessário caracterizar e quantificar quais são os resíduos industriais perigosos, não-perigosos e inertes gerados, além de definir as etapas de manuseio, armazenamento, transporte, tratamento, reciclagem e disposição final.

Por outro lado, a implantação de uma política de crescimento sustentável do país abrange, de forma direta, a tratativa da questão dos resíduos sólidos industriais, sendo que o desenvolvimento e o domínio de tecnologias e de técnicas de reciclagem desses resíduos implicará, sem dúvida, em um crescimento industrial, comercial e econômico.

1.3. AVALIAÇÃO REGIONAL

Nos últimos 25 anos, diversas indústrias novas foram instaladas na região central do Estado de São Paulo. Essas indústrias implantaram todos seus setores envolvidos na fabricação de seus produtos, quer aqueles que envolvem uma tecnologia fina e requintada, quer outros que geram a matéria prima a ser processada na confecção das partes que compõem o objeto comercializável.

Verifica-se, por exemplo, que somente uma das indústrias instalada na cidade de São Carlos, após implantação de sistemas de redução e reaproveitamento, gera cerca de 700 toneladas/mês de resíduo sólido proveniente das areias de fundição aglomeradas com argila, as

quais são depositadas em aterros industriais especialmente construídos para esse fim.

Entre os vários tipos de areias de fundição utilizadas nos processos de moldagem de peças metálicas, a pesquisa estudou exclusivamente os resíduos sólidos provenientes das areias de fundição aglomeradas com argila, provenientes da indústria citada.

Os estudos realizados estabelecem um ponto de partida na problemática existente, que eventualmente poderão ser adaptados a outras situações, no futuro, de casos semelhantes.

1.4. OBJETIVO GERAL

A partir de uma avaliação da composição potencial do resíduo de areia de fundição aglomerada com argila e, através da técnica de estabilização por solidificação em matrizes melhoradas de cimento Portland, o estudo procurou estabelecer composições, viáveis tecnicamente, para introduzir a reciclagem do resíduo em questão no setor da construção civil, empregando as composições estabilizadas na fabricação de tijolos maciços, visando a aplicação na execução de alvenarias.

1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Verificar os comportamentos mecânico, físico e quanto à estabilização química das matrizes de cimento Portland, compostas com o resíduo, com adição de argila bentonita sódica.

2. Verificar os comportamentos mecânico, físico e quanto à estabilização química das matrizes de cimento Portland, compostas com o resíduo, com adição de sílica ativa.

3. Verificar os comportamentos mecânico, físico e quanto à estabilização química das matrizes de cimento Portland, compostas com o resíduo, com adição de argila bentonita sódica e sílica ativa.

4. Determinar a melhor composição para a produção de tijolos maciços e verificar os comportamentos mecânico, físico e quanto à estabilização química dos mesmos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo a norma *ABNT NBR-10004: Resíduos Sólidos – Classificação (2004)*, resíduos sólidos são 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 soluções, técnica e economicamente inviáveis, face à melhor tecnologia disponível.

Ainda conforme a Norma citada, os resíduos são classificados em:

- a) Resíduos Classe I – Perigosos;
- b) Resíduos Classe II – Não Perigosos;
 - Classe II A – Não Inertes
 - Classe II B – Inertes

São considerados resíduos perigosos os que apresentarem características de periculosidade, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podendo representar riscos à saúde pública e ao meio ambiente, assim como os que possuem propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Os resíduos não perigosos e não inertes são aqueles que não se enquadrarem nas classificações de resíduos perigosos (classe I) ou de resíduos não perigosos e inertes, podendo ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Inertes são considerados quaisquer resíduos que quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR-10007/2004¹⁰, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR-10006/2004⁹, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os aspectos cor, turbidez, dureza e sabor.

Para compreender o significado de resíduos sólidos não basta uma análise de definições baseadas no aspecto material, mas também uma reflexão sobre que papel eles representam no contexto cultural e como as sociedades se relacionaram historicamente com seus rejeitos.

Na Europa, existe uma forte preocupação com a recuperação e reaproveitamento energético de resíduos sólidos. Na China, o povo considera os resíduos sólidos orgânicos como uma responsabilidade do cidadão. Nos Estados Unidos, desde a década de 80, os resíduos sólidos são tratados por legislação específica, visando tratar os grandes depósitos espalhados pelo país. O Brasil, apesar de possuir uma legislação adequada, não consegue promover mudanças mais rápidas e eficientes no que diz respeito à diminuição do seu potencial de geração de resíduos sólidos e ao desenvolvimento de tecnologias de tratamento, reaproveitamento e reciclagem.

2.2. AREIAS DE FUNDIÇÃO AGLOMERADAS COM ARGILA

Fundição é o método de dar forma aos metais no estado líquido, introduzindo-os em um molde com a forma desejada, e, então, deixando-os solidificar (SIEGEL, 1979)⁵⁸.

Na fabricação de peças metálicas, através do processo de fundição, utilizam-se moldes confeccionados tanto de metal, como à base de areia, os quais serão preenchidos com o metal no seu estado líquido. Os moldes metálicos são empregados em fundição sobre pressão ou em fundição em coquilha, métodos estes geralmente utilizados para a

obtenção de peças consideradas especiais. A grande maioria das peças metálicas fundidas é obtida em moldes à base de areia, em moldagem do tipo manual ou mecanizada (KONDIC, 1973)³⁹.

As areias de fundição ou de moldação são constituídas, essencialmente, por materiais granulados refratários (sílica, cromita, zirconita, olivina ou chamote), denominados “areia base”, e pelo aglomerante desses grãos, seja mineral (argila) ou orgânico (óleos, resinas poliméricas, derivados de cereais, etc...), o qual possibilita a confecção de moldes monolíticos de fundição. A escolha da areia base e do tipo de aglomerante depende do processo de fundição empregado, tamanho da peça a ser fabricada e tipo de metal, ou liga de metal, que será utilizado (BROSCH & RÉ, 1965)²¹.

A areia base é o constituinte presente em maior proporção na composição de areias de fundição, sendo a mais comum, a sílica, constituinte das areias sílico-argilosas naturais ou sintéticas. O tipo de aglomerante mais utilizado na obtenção de areias de fundição é a argila, sendo a mais empregada a bentonita. Em vários tipos de processos de fundição, as areias de moldagem sofrem adições de outros produtos, denominados aditivos, cuja finalidade é melhorar certas características físicas e comportamentais do molde para o vazamento do metal líquido. Os aditivos, quando utilizados, participam da composição das areias de fundição em pequenas proporções e podem ser citados como exemplo: pó de carvão mineral, pó de madeira, materiais betuminosos, óxido de ferro. (PEREIRA, 1991)⁵⁰

As areias de fundição aglomeradas com argila respondem pela maior parcela de peças fundidas produzidas em todo o mundo. No Brasil, prevalece esta situação, sendo que 80% das fundições nacionais utilizam tais areias na elaboração dos moldes. (SENAI, 1987)⁵⁷

A areia base mais empregada na obtenção de areias de fundição aglomeradas com argila é a areia do tipo silicosa. As areias silicosas são encontradas principalmente em jazidas formadas pela desagregação de rochas através do intemperismo, tendo como origem basicamente os arenitos e quartzitos. Do ponto de vista estrutural, a sílica é formada pela reunião de tetraedros de faces eqüilaterais com um átomo de oxigênio em cada vértice e um átomo de silício ao centro (SiO_4). Entretanto, os tetraedros são interligados através de uma das arestas e todos os átomos de oxigênio são comuns a dois tetraedros, o que conduz à fórmula SiO_2 .

As três formas cristalizadas mais conhecidas da sílica, em seu estado anidro, são: o quartzo, a tridimita e a cristobalita. Na forma não cristalizada temos a sílica fundida ou vítrea, de estrutura amorfa. A sílica mais utilizada na composição das areias de fundição apresenta-se praticamente sob a forma de quartzo, de massa específica aproximadamente igual a $2,65 \text{ Kg/dm}^3$ e ponto de fusão entre 1650°C e 1750°C . (SENAI, 1987)⁵⁷

As argilas são silicatos de alumina hidratados e são constituídas por vários minerais denominados "argilo-minerais". Em sua

composição participam principalmente os seguintes elementos: silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, potássio e sódio.

As argilas mais utilizadas como aglomerante para a obtenção de areias de fundição são as denominadas “bentonitas”. São argilas constituídas em aproximadamente 80% pelo argilo-mineral montmorilonita. Elas geralmente costumam conter alguns elementos e impurezas como metais alcalinos ou alcalino-ferrosos, matérias orgânicas e areia silicosa de grãos finos.

As bentonitas, dependendo da predominância de cátions Ca^{++} ou Na^+ no seu estado natural, são denominadas respectivamente cálcicas ou sódicas. Existem várias jazidas de bentonitas cálcicas no mundo, sendo que as mais conhecidas estão localizadas na Itália, na Alemanha, na França, no Marrocos e no Brasil (Estado da Paraíba). Por outro lado, as jazidas de bentonitas sódicas são raras e as mais importantes situam-se na região de Fort Benton, no Estado de Wyoming (EUA), dando origem à sua denominação. (BROSCH, 1962)²²

Entre os dois tipos de bentonitas naturais citadas, as que apresentam melhores propriedades, para o processo de fundição, são as sódicas. Por essa razão, costuma-se realizar um tratamento em algumas bentonitas cálcicas, transformando-as em bentonitas sódicas artificiais. Este tratamento possui o nome de “ativação” e consiste em colocar a bentonita cálcica em contato com um sal de sódio, para que ocorra a substituição de cátions Ca^{++} por cátions Na^+ . As bentonitas sódicas artificiais são bastante utilizadas para a confecção de moldes nas

fundições nacionais e são conhecidas como bentonitas sódicas ativadas. (SENAI, 1987)⁵⁷

2.3. SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

2.3.1. DEFINIÇÕES

A solidificação/estabilização de resíduos sólidos é um processo também conhecido como encapsulamento (encapsulação) ou fixação e alguns autores grafam como estabilização/solidificação. Em fim, trata-se de uma tecnologia que vem sendo utilizada como alternativa aos processos tradicionais de tratamento de resíduos e, principalmente, como um meio de facilitar o manuseio, o transporte e o armazenamento. Consiste, basicamente, em estabilizar, química e/ou fisicamente os resíduos sólidos, através da adição de aglomerantes ou da inserção em invólucros eficientes.

Conforme CLÁUDIO (1987)²⁴, “o termo encapsulamento refere-se ao processo utilizado para destoxificar, imobilizar, ou restringir a capacidade de solubilização de um resíduo, tornando-o menos tóxico ao meio ambiente”.

A *Environmental Protection Agency (EPA)* dos E.U.A. estabelece, em suas publicações, a denominação *solifidication/stabilization* para designar esta tecnologia, ou na forma reduzida *S/S*, a qual vem sendo adotada internacionalmente. Portanto, o presente trabalho passará a adotar a forma **S/S** para denominar o processo de solidificação/estabilização de resíduos.

Segundo POON et al. (1986)⁵³, “este processo é um pré-tratamento indutor de reações químicas e mecanismos físicos que fixam elementos ou compostos tóxicos em polímeros impermeáveis ou em cristais estáveis”.

Estabilização refere-se às técnicas de minimizar a periculosidade potencial de um resíduo, convertendo os contaminantes à sua mais reduzida forma de solubilidade, mobilidade e toxicidade. A estabilização não modifica necessariamente a natureza física e as características de manuseio do resíduo.

Solidificação refere-se às técnicas de encapsulação do resíduo em um sólido monolítico com elevada integridade estrutural. A solidificação não envolve necessariamente uma interação química entre os resíduos e os reagentes dos materiais aglomerantes utilizados, mas deve blindar mecanicamente o resíduo dentro da estrutura sólida. A mobilidade dos contaminantes é restringida pela drástica diminuição da área superficial exposta à lixiviação e/ou pela isolação dos resíduos em cápsulas impermeáveis. (CONNER & HOEFFNER, 1998)²⁸

O processo S/S oferece uma melhoria das condições de manuseio dos resíduos, pela produção de uma matriz monolítica com características físicas mais desenvolvidas, de forma a otimizar o seu transporte, estocagem, disposição e reutilização. Essa modificação estrutural deve reduzir substancialmente a solubilidade dos contaminantes tóxicos. (MERRITT et al., 1993)⁴⁵

2.3.2. BREVE HISTÓRICO

Com poucas exceções, a utilização da tecnologia S/S de resíduos sólidos perigosos tem início após 1970, com a criação da Environmental Protection Agency (EPA), nos Estados Unidos da América.

Um grande impulso é promovido nessa tecnologia quando é aprovada a Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) em 1976, porém sua implementação somente ocorre após 1980, com a promulgação da regulamentação de um sistema federal para o gerenciamento de resíduos perigosos, com subtítulo C da RCRA, o qual é constituído de subsídios para o desenvolvimento de critérios para determinar quais resíduos são perigosos. Também estabelece procedimentos para disposição dos resíduos, além de encorajar os Estados a desenvolver seus próprios programas específicos de regulamentação.

Em 1984, a aprovação de emendas, através da Hazardous and Solid Waste Amendments (HSWA), promove a revisão da RCRA, estabelecendo critérios mais específicos e prazos restritos para a criação e aprovação de regulamentação referente. As publicações realizadas por RCRA e HSWA definem com detalhes a geração, manuseio, tratamentos e disposição de resíduos. Uma ramificação da regulamentação da RCRA estabelece restrições para a disposição de resíduos no solo, denominada Land Disposal Restrictions (LDR).

Para efetuar a remediação de inúmeras regiões que apresentavam contaminação do solo e que ameaçavam o meio ambiente,

cria-se o Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA), em 1986. (CONNER & HOFFNER, 1998)²⁸

A utilização da tecnologia S/S é avaliada através de procedimentos e critérios estabelecidos em normas Federais, Estaduais ou Municipais, ou através de agências regulamentadoras para projetos individuais, utilizando referentes métodos de ensaio. Estes procedimentos e métodos de ensaio compreendem dois grupos: propriedades físicas e propriedades químicas. As propriedades físicas consistem em resistências mecânicas, permeabilidade, durabilidade e forma. As propriedades químicas geralmente são estabelecidas através da resistência do resíduo tratado à lixiviação, solubilização ou extração dos contaminantes da massa sob várias condições. Nos E.U.A., o teste utilizado na maioria dos casos é o Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), mais adequado para resíduos contendo metais. Para resíduos com constituintes orgânicos é utilizado o Total Constituent Analysis (TCA). (U.S. EPA , 1991 e 1994)^{60,61}

No Brasil, a regulamentação dos resíduos sólidos industriais tem início em 1986, com a criação da Comissão de Estudo de Amostragem, Ensaio e Classificação de Resíduos Industriais, a qual publica, em 1987, através da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), uma série de quatro normas: NBR10004 – Resíduos Sólidos – Classificação, NBR10005 – Lixiviação de Resíduos – Procedimento, NBR10006 – Solubilização de Resíduos – Procedimento, NBR10007 – Amostragem de Resíduos – Procedimento. Em 2004, estas normas

passam por um estudo de revisão e são publicadas as referentes segundas edições, vigentes no momento.

No caso particular, dos resíduos sólidos constituídos pelas areias de fundição, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, do Estado de São Paulo, Brasil, publicou Decisão de Diretoria nº 152/2007/C/E, de 08 de agosto de 2007, intitulada “Procedimentos para Gerenciamento de Areia de Fundição”, incluindo um capítulo onde constam procedimentos para a avaliação de propostas de reutilização do resíduo areia de fundição na fabricação de artefatos de cimento.

2.3.3. TÉCNICAS DESENVOLVIDAS

Existem vários processos e técnicas S/S, sendo que os principais são: a base de cimento, a base de cal e materiais pozzolânicos (exceto cimento), a base de argilas, a base de polímeros orgânicos, encapsulamento em invólucro inerte, vitrificação e auto-solidificação. Como o objeto de pesquisa do presente trabalho é o estudo da S/S em matrizes de cimento Portland, as demais técnicas serão brevemente comentadas.

2.3.3.1. Técnica baseada em materiais pozzolânicos

As pozzolanas são materiais naturais ou artificiais contendo principalmente sílica ativa, a qual, em presença de água e cal, forma silicatos de cálcio que apresentam propriedades aglomerantes.

Os materiais pozzolânicos mais comumente utilizados no tratamento de resíduos são as cinzas volantes, poeiras de forno de

cimento e escória de alto-forno. Também xistos calcinados, telhas e tijolos cerâmicos moídos, pedra-pome e cinzas de carvão geradas em termoelétricas são materiais que apresentam propriedades pozolânicas.

O baixo custo dos materiais empregados, disponíveis em grande escala, aliado ao fato desta técnica não necessitar equipamentos especiais no processamento, bem como o alto grau de conhecimento das reações envolvidas, são considerados como suas principais vantagens. Por outro lado, a lentidão das reações e o fato do material solidificado normalmente não apresentar grande resistência mecânica, são os principais inconvenientes desta técnica.

2.3.3.2. Técnica baseada em polímeros orgânicos

A técnica S/S mais testada com polímeros orgânicos é o sistema uréia-formaldeído. Neste processo, efetua-se a mistura do resíduo com um pré-polímero em um recipiente e adiciona-se um catalisador, o qual provocará o endurecimento do polímero, continuando-se a mistura até que o catalisador esteja totalmente disperso. (CETESB, 1985)²⁵

O material polimerizado geralmente não se combina quimicamente com o resíduo, mas forma uma massa esponjosa que captura as partículas sólidas. Isto representa um grande inconveniente para o processo, devido ao risco dos contaminantes serem liberados com a ruptura ou a degradabilidade do polímero. Além disso, cuidados especiais são exigidos durante a operação, uma vez que durante a reação de polimerização são liberados gases tóxicos.

As vantagens do processo estão associadas ao pequeno volume e à baixa massa específica do material solidificado, quando comparado com outros processos. Também, a quantidade de material solidificante necessária é comparativamente baixa. (CLÁUDIO, 1987)²⁴

2.3.3.3. Técnica baseada em invólucros

O processo baseado em invólucros, ou encapsulamento propriamente dito, é aquele no qual o resíduo é inicialmente aglomerado, ou prensado, e a seguir, envolto por uma camisa ou jaqueta de material inerte. O material de revestimento mais utilizado é o polietileno, que é sujeito a danos quando exposto à temperaturas elevadas ou a raios ultravioleta. Contudo, uma vez garantida a inviolabilidade da jaqueta, esta técnica oferece segurança total contra lixiviação e solubilização de poluentes.

O elevado custo, decorrente dos equipamentos sofisticados e da mão-de-obra especializada, é a principal desvantagem desta técnica. (CETESB, 1985)²⁵

2.3.3.4. Técnica de vitrificação

Algumas experiências têm sido desenvolvidas no sentido de combinar resíduos com sílica e fundir a mistura formando um vidro ou um mineral de silicato sintético. Tanto o vidro como os silicatos cristalinos são lixiviados muito lentamente pela água, o que faz com que este processo

seja geralmente proposto para se produzir um material seguro quanto à disposição final.

Entretanto, esta técnica precisa estar associada a uma indústria de fabricação de vidros ou requer uma instalação específica muito dispendiosa. Além disso, necessita de energia intensiva, freqüentemente acima de 1350 °C, para que a mistura resíduo-silicato seja fundida. (CETESB, 1985)²⁵

2.3.3.5. Técnica de auto-solidificação

Alguns resíduos industriais, tais como lodos de limpeza de exaustão ou dessulfurização, contém grandes quantidades de sulfato ou sulfeto de cálcio. Esta lama, quando calcinada, apresenta propriedades aglomerantes, desta forma, esta técnica foi desenvolvida para tratar esses tipos de resíduos, a fim de torná-los auto-solidificáveis. Normalmente, uma pequena porção do lodo, em torno de 8 a 10% do total, é calcinada, sob condições cuidadosamente controladas, para produzir o aglomerante. Este resíduo calcinado é reintroduzido no lodo, juntamente com aditivos patenteados, proporcionando uma total solidificação.

O produto resultante é um material resistente, de baixa permeabilidade e com boa retenção de metais pesados, eventualmente presentes no resíduo. As desvantagens do processo residem na necessidade de equipamentos especiais e energia adicional para promover a calcinação. (CETESB, 1985)²⁵

2.3.3.6. Técnica baseada em argilas

Na tecnologia S/S, as argilas mais comumente utilizadas são as bentonitas, tratando-se de argilas formadas basicamente por argilominerais do grupo das esmectíticas. (GRIM, 1978)³²

A estrutura cristalina destes argilominerais caracteriza-se por empilhamento, onde duas folhas de silicato tetraédricas encerram uma camada central octaédrica constituída principalmente por alumínio, magnésio e ferro. As camadas apresentam um desequilíbrio de cargas elétricas que é contrabalanceado pela adsorção reversível de cátions hidratados entre as camadas estruturais, conferindo às bentonitas uma alta capacidade de troca catiônica. (SANTOS, 1992)⁵⁵

A alta capacidade catiônica associada a outras características, como a grande área superficial, fazem com que as bentonitas apresentem importantes propriedades tecnológicas. Uma delas resulta da transformação de bentonitas sódicas em argilas organofílicas por meio da adição de sais quaternários de amônio (McBRIDE, et.al.,1985)⁴². Essas argilas organofílicas vêm sendo aplicadas em S/S, associadas ao cimento, para que interajam com os compostos orgânicos dos resíduos, garantam sua fixação através da troca da amônia pelos compostos orgânicos, e os impeçam de interferir no processo de hidratação do cimento. (WARREN, et.al., 1986)⁶³

No Brasil, pesquisas utilizando bentonitas sódicas modificadas apresentaram bons resultados na fixação de resíduo organo-arsenial (HANNA, 1990)³³ e de fenol e rejeitos fenólicos (OLIVEIRA, 1992)⁴⁷.

BÜCHLER et al. (1986)²³, usaram bentonita de Wyoming saturada com cloreto de tetrametilamônio na atenuação da poluição causada por vinhaça e concluíram que embora açúcar, aminoácidos e goma tenham sido pouco adsorvidos, os compostos fenólicos foram adsorvidos em até 80%.

Estudos de S/S de metais incluindo argilas hidrofílicas como adsorventes são escassos. WOLFE et al. (1986)⁶⁶, apontam para a formação de um carbonato de chumbo hidratado, induzida pela substituição do cálcio na argila pelo chumbo, quando uma argila esmectítica sódica foi utilizada.

2.3.3.7. Técnica baseada em cimento Portland

Na tecnologia S/S, o termo matriz compreende a estrutura básica, na qual os resíduos são química e/ou fisicamente fixados. A utilização do cimento como base do processo teve início na década de cinquenta, na Europa e E.U.A., na disposição de resíduos nucleares de baixa radioatividade. (CONNER, 1990)²⁷

A fixação de resíduos sólidos perigosos em matriz de cimento Portland é a técnica S/S mais empregada, devido à simplicidade do processo e ao baixo custo. (DANIALI, 1990)³¹

Quando misturado com água, o cimento Portland é hidratado, formando posteriormente um sólido rígido. A hidratação se dá em dois estágios, sendo que no primeiro ocorre a formação de uma membrana na superfície das partículas de silicato de cálcio e no segundo, após a cura

inicial, observa-se em cada grão de cimento o crescimento de cristais, que se irradiam por todo o espaço intersticial. Tem-se, dessa forma, um aumento no comprimento e no número de cristais, que gradualmente começam a emaranhar-se, uns aos outros e, quando cessa o seu crescimento, começam a unir-se lateralmente formando lâminas contínuas do material. Essa matriz cristalina incorpora os agregados e/ou resíduos adicionados na massa monolítica. (CETESB, 1985)²⁵

A técnica S/S baseada em cimento Portland é particularmente recomendada para resíduos metálicos. A Tabela 2.1 apresenta um quadro de compatibilidade de alguns resíduos com o processo de S/S em cimento estudadas. (SAITO, et.al., 1985; apud HANNA, 1996)³⁴

As alternativas de tratamento para resíduos contendo metais pesados são limitadas, os metais não podem ser destruídos por incineração e a S/S é considerada a melhor técnica de disposição viável atualmente. Quando o cimento é hidratado, forma-se cerca de 20-30% de hidróxido de cálcio o que leva à formação de uma solução sólida nos poros com pH em torno de 12-13. Este meio alcalino propicia a formação de compostos insolúveis como hidróxidos e silicatos metálicos. Os hidróxidos metálicos são fortemente estáveis na faixa de pH de 7 a 11 e os silicatos numa faixa maior. (MACKAY & EMERY, 1992)⁴⁰

Tabela 2.1 – Exemplos de aplicação da técnica S/S em matrizes de cimento

INDÚSTRIA/ATIVIDADE	TIPO DE RESÍDUO	POLUENTE
Galvanoplastia	Torta, lama	Cr, Pb, Cu, Ni, Zn
Galvanoplastia	Torta, lama	Zn
Componentes elétricos	Torta, lama	C, Sn, Pb
Químicos orgânicos	Líquido	Pb, Ti
Lavagem de gases	Líquido	Sulfatos alcalinos
Catálise petroquímica	Sólido	Co, Mo, Ni
Tratamentos metálicos	Líquido	Zn, Mg, Ba, ácidos
Farmacêutica	Torta, lama	Zn, Hg, Ba, Be
Acabamento metálico	Sólido	Cu, Ni, Zn
Incineração	Torta, lama	Mn, Fe, Pb, Zn, V
Decapagem ácida	Torta, lama	Cr, Zn, Fe, ácidos
Acabamento de Al	Torta, lama	Cr, Cu, ácidos

As vantagens da utilização da técnica S/S à base de cimento Portland são: (CETESB, 1985)²⁵; (U.S.EPA, 1990)⁶²; (MACKAY, 1992)⁴⁰ e (CONNER et al, 1992)²⁹

- O cimento Portland e os equipamentos utilizados têm custos relativamente baratos e o consumo de energia é baixo;
- A tecnologia, o controle da mistura e o manuseio são bastante conhecidos;
- A secagem e a desidratação do resíduo não são necessárias, visto que o cimento precisa de água para sua hidratação e posterior endurecimento, assim, a quantidade de água da mistura pode ser dosada em função do teor de água presente no resíduo;
- O sistema é tolerante à maioria das variações químicas; o cimento, dada a sua alcalinidade, pode neutralizar ácidos, e não é afetado por oxidantes fortes, tais como nitratos;

- Possibilidade de controlar a resistência mecânica e a permeabilidade dos produtos finais, permitindo que tenham uma alta capacidade de suporte e se tornem bons materiais de construção;
- As características de lixiviação e solubilização do produto final podem ser melhoradas, se necessário, através de revestimento selante;
- Possibilidade de realizar o tratamento no próprio local onde os resíduos foram indevidamente depositados.

As desvantagens desta técnica são: (CETESB, 1985)²⁵

- A necessidade de quantidades relativamente grandes de cimento, o que em parte é compensado pelo baixo custo do material;
- A massa e o volume do produto final são normalmente o dobro dos de outros processos de fixação;
- A necessidade de aterros industriais para a disposição dos produtos finais não revestidos, uma vez que alguns poluentes são liberados por lixiviação, especialmente por soluções levemente ácidas;
- A necessidade de efetivar um pré-tratamento ou utilizar cimentos especiais e aditivos de custo elevado, caso os resíduos contenham grandes quantidades de impurezas que afetem o endurecimento e a cura da mistura resíduo-cimento, tais como boratos e sulfatos;
- Possibilidade da formação de amônia, a partir do íon amônio, devido à alcalinidade do cimento.

2.3.4. TRABALHOS DESENVOLVIDOS

A tecnologia S/S é a mais utilizada nos EUA para o tratamento de solos contaminados. WILK (1999)⁶⁵ relata que 30% dos locais contaminados foram tratados com esta tecnologia, mostrando-se eficaz para o tratamento de solos e lamas contaminadas com uma larga variedade de contaminadores orgânicos e inorgânicos. A técnica baseada em matrizes de cimento Portland é a mais empregada e, freqüentemente, aliada à utilização de adições minerais e aditivos, como cinzas volantes, sílica ativa, materiais pozolânicos, calcário e outros.

Alguns pesquisadores vêm utilizando o processo de estabilização de resíduos perigosos contendo metais pesados através da solidificação em matrizes de cimento Portland, assim como: MERRIT & BATCHELOR (1993)⁴⁵, WILK (1997)⁶⁴, CONNER (1997)³⁰, ADASKA (1998)¹² e BHATTY (1999)¹⁹.

No Brasil, alguns trabalhos podem ser citados: HANNA (1990 e 1996)^{33,34}, PABLOS (1995)⁴⁹, OLIVEIRA (1996)⁴⁸, MARAGNO (1999)⁴¹, PINTO (2001)⁵², SILVA et al (2002)⁵⁹ e ALBERONI (2006)¹⁴.

PABLOS (1995)⁴⁹, em dissertação de mestrado, estudou o desempenho de matrizes de cimento Portland (tipo CPIIE32) no processo de estabilização do resíduo sólido proveniente do descarte das areias de fundição aglomeradas com argila, gerado pela mesma indústria. As matrizes foram confeccionadas nas proporções cimento:resíduo de 1:3, 1:5 e 1:7. Para avaliar a eficiência de fixação foi empregado somente o ensaio de lixiviação estabelecido em ABNT NBR10005 (1987). Os

resultados dos ensaios indicaram que nenhum metal foi detectado no extrato lixiviado em quantidades acima das recomendadas pela norma ABNT NBR10004 (1987), o que indicaria a estabilização do resíduo nas matrizes cimentícias estudadas. Entretanto, não foi verificado o comportamento das matrizes quando submetidas ao ensaio de solubilização previsto em ABNT NBR10006 (1987).

Tabela 2.2 – Lixiviação matrizes solidificadas (1:3), 28 dias

Elemento	Unidade	Lixiviação (mg/L)	Lixiviação (mg/L) L.M.
Alumínio	mg Al/L	nd	---
Cádmio	mg Cd/L	nd	0,5
Chumbo	mg Pb/L	nd	5,0
Cobre	mg Cu/L	nd	---
Cromo Total	mg Cr/L	nd	5,0
Ferro	mg Fe/L	0,02	---
Manganês	mg Mn/L	0,01	---
Zinco	mg Zn/L	nd	---

nd – elemento não detectado

L.M.- Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (1987)

Fonte: PABLOS (1995)⁴⁹

Tabela 2.3 – Lixiviação matrizes solidificadas (1:5), 28 dias

Elemento	Unidade	Lixiviação (mg/L)	Lixiviação (mg/L) L.M.
Alumínio	mg Al/L	nd	---
Cádmio	mg Cd/L	nd	0,5
Chumbo	mg Pb/L	nd	5,0
Cobre	mg Cu/L	nd	---
Cromo Total	mg Cr/L	nd	5,0
Ferro	mg Fe/L	0,04	---
Manganês	mg Mn/L	0,02	---
Zinco	mg Zn/L	nd	---

nd – elemento não detectado

L.M.- Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (1987)

Fonte: PABLOS (1995)⁴⁹

Tabela 2.4 – Lixiviação matrizes solidificadas (1:7), 28 dias

Elemento	Unidade	Lixiviação (mg/L)	Lixiviação (mg/L) L.M.
Alumínio	mg Al/L	0,04	---
Cádmio	mg Cd/L	nd	0,5
Chumbo	mg Pb/L	nd	5,0
Cobre	mg Cu/L	nd	---
Cromo Total	mg Cr/L	nd	5,0
Ferro	mg Fe/L	0,18	---
Manganês	mg Mn/L	0,07	---
Zinco	mg Zn/L	nd	---

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (1987)

Fonte: PABLOS (1995)⁴⁹

OLIVEIRA (1996)⁴⁸ também estudou o processo de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland (tipo CPIIE32) utilizando o mesmo resíduo, proveniente da mesma indústria. As matrizes foram elaboradas nas proporções cimento:resíduo 1:3, 1:5, 1:8 e 1:10, as quais foram submetidas aos ensaios de lixiviação, solubilização, difratometria de raios-X e resistência à compressão, nas idades de 7, 28 e 90 dias. Em nenhuma das misturas de resíduo e cimento ensaiadas, as concentrações de metais, na lixiviação, ultrapassaram os limites estipulados pela ABNT NBR10004 (1987). Os resultados dos ensaios de solubilização, para todas as matrizes e em todas as idades, demonstraram que as concentrações de Cromo (Cr) e Alumínio (Al) ultrapassaram os limites estipulados pela ABNT NBR10004 (1987), não permitindo a classificação destes materiais como inertes. Os resultados de difratometria de raios-X permitiram a identificação dos compostos químicos formados pelos elementos de interesse: Alumínio, Cromo, Ferro, Cobre e Zinco. Portanto, os difratogramas indicaram a ocorrência de encapsulamento

químico proporcionado para a incorporação dos elementos constituintes do resíduo à estrutura cristalina da matriz.

Tabela 2.5 – Lixiviação matrizes solidificadas (1:3), 90 dias

Elemento	Unidade	Lixiviação (mg/L)	Lixiviação (mg/L) L.M.
Alumínio	mg Al/L	0,32	---
Cádmio	mg Cd/L	nd	0,5
Chumbo	mg Pb/L	nd	5,0
Cobre	mg Cu/L	0,02	---
Cromo Total	mg Cr/L	0,06	5,0
Ferro	mg Fe/L	nd	---
Manganês	mg Mn/L	nd	---
Níquel	mg Ni/L	nd	---
Zinco	mg Zn/L	0,07	---

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (1987)

Fonte: OLIVEIRA (1996)⁴⁸

Tabela 2.6 – Lixiviação matrizes solidificadas (1:5), 90 dias

Elemento	Unidade	Lixiviação (mg/L)	Lixiviação (mg/L) L.M.
Alumínio	mg Al/L	nd	---
Cádmio	mg Cd/L	nd	0,5
Chumbo	mg Pb/L	nd	5,0
Cobre	mg Cu/L	0,02	---
Cromo Total	mg Cr/L	0,08	5,0
Ferro	mg Fe/L	nd	---
Manganês	mg Mn/L	nd	---
Níquel	mg Ni/L	nd	---
Zinco	mg Zn/L	0,12	---

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (1987)

Fonte: OLIVEIRA (1996)⁴⁸

Figura 2.1 – Difratoograma da matriz solidificada (1:3), 28 dias

Fonte: OLIVEIRA (1996)⁴⁸

Figura 2.2 – Difratoograma da matriz solidificada (1:3), 28 dias

Fonte: OLIVEIRA (1996)⁴⁸

2.4. ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND

Podemos definir uma argamassa como a mistura de aglomerantes e agregados miúdos, possuindo a capacidade de endurecimento e aderência. Sua denominação é função, geralmente, do aglomerante utilizado.

Portanto, uma argamassa de cimento Portland é considerada como um material formado por três componentes: agregado miúdo, cimento Portland e água. A mistura de algum tipo de cimento e certa quantidade de água é denominada “pasta de cimento”. Quando o cimento interage com a água, ocorre uma reação química de hidratação que faz com que o cimento desenvolva suas propriedades aglomerantes, envolvendo e aderindo-se aos grãos do agregado, unindo-os em um bloco monolítico.

As argamassas utilizam como agregado miúdo geralmente as areias naturais ou artificiais. As naturais são aquelas encontradas na natureza já na sua forma de utilização, como as areias de rios, de bancos (morros ou barrancos) e de minas. As areias artificiais são as que passam por algum processo de fragmentação para que possam alcançar a condição apropriada para o uso. Portanto, o termo artificial refere-se ao modo de obtenção e não ao material em si.

Na técnica de S/S em matrizes de cimento Portland, ora estudada, o resíduo sólido desempenha o papel de agregado, substituindo, parcialmente ou totalmente, as areias novas geralmente

empregadas. Portanto, o material resultante da mistura de cimento e resíduo pode ser considerado uma argamassa.

As argamassas de cimento Portland são materiais amplamente utilizados na construção civil e podemos citar, como principais finalidades, o assentamento de alvenarias, o revestimento de elementos construtivos, a execução de camadas de regularização, a produção de tijolos e blocos, a produção de painéis de vedação e divisórias e a execução de argamassa armada. (PETRUCCI, 1993)⁵¹

Como vimos argamassa de cimento Portland é um material compósito obtido após o endurecimento de uma mistura, em proporções adequadas, de agregado miúdo, cimento e água. Portanto, suas características e propriedades estão vinculadas à quantidade e qualidade de seus materiais constituintes e, também, à forma como são executadas as fases de preparação, lançamento, adensamento e cura.

No seu estado fresco, as características que podem ser consideradas como as mais importantes são a consistência e a trabalhabilidade. Consistência é a propriedade das argamassas de se deformarem sob a ação de uma força externa ou de seu peso próprio, sendo que é influenciada pela composição (traço), pelo tipo de cimento, pelo teor de água/materiais secos (fator de adensamento) e pela composição granulométrica e forma dos grãos do agregado. De acordo com a consistência, as argamassas podem ser classificadas em secas, plásticas ou fluidas. A trabalhabilidade é uma propriedade subjetiva, porém pode ser definida como a maior ou menor facilidade com que a

argamassa é utilizada sem que haja segregação de seus componentes, ou seja, mantendo sua homogeneidade. A trabalhabilidade normalmente é determinada através da consistência, porém podemos ter argamassas trabalháveis com diferentes consistências, de acordo com a finalidade e com os processos de elaboração e execução.

Várias são as propriedades que as argamassas devem apresentar em seu estado endurecido, e a importância delas varia de acordo com cada utilização final. Para o presente trabalho, em particular, as propriedades mais importantes a serem consideradas são: resistência à compressão, absorção de água e durabilidade.

Em fim, podemos dizer que, na elaboração e utilização de uma argamassa de cimento Portland, é necessário determinar a qualidade e as proporções mais adequadas de cada um de seus componentes, visando que: (PETRUCCI, 1993)⁵¹

- quando fresca seja trabalhável, mantendo a homogeneidade nas etapas de produção e aplicação;
- quando endurecida apresente, na idade especificada, as propriedades exigidas na sua respectiva utilização;
- seja durável, isto é, mantenha suas propriedades ao longo de sua vida útil.

2.4.1. CIMENTO PORTLAND

Cimento, na acepção da palavra, pode ser considerado todo material com propriedades adesivas e coesivas capaz de unir fragmentos

de minerais entre si de modo a formar um todo compacto. (NEVILLE, 1997)⁴⁶

Os cimentos que interessam no preparo de argamassas e concretos, para utilização na construção civil, têm a propriedade de endurecer na presença de água, devido a reações químicas com esse material, ao mesmo tempo, após endurecidos resistem à ação da água, sendo portanto denominados aglomerantes hidráulicos.

Os cimentos hidráulicos são constituídos principalmente por silicatos e aluminatos de cálcio e podem ser classificados de forma ampla como cimentos naturais, cimentos Portland e cimentos aluminosos. (NEVILLE, 1997)⁴⁶

A patente do cimento Portland foi registrada em 1824 por John Aspdin. A denominação, dada originalmente devido à semelhança de cor e qualidade com a pedra de Portland – um calcário de Dorset, permanece até hoje no mundo todo. Essa denominação é usada para designar um cimento obtido pela mistura em proporções apropriadas de materiais calcários e argilosos, aquecida até a temperatura de clínquerização, moendo-se o clínquer resultante.

A ASTM C 150 (1991)¹⁵ define o cimento Portland como um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição. Os clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de um material

sinterizado, produzido quando uma mistura de matérias-primas de composição pré-determinada é aquecida a altas temperaturas.

Para a obtenção do cimento Portland utilizam-se matérias-primas constituídas principalmente de material calcário, presente em rochas calcárias, e sílica e alumina, encontradas em argilas ou xistos.

O processo de fabricação do cimento Portland consiste essencialmente em moer as matérias-primas, misturá-las intimamente nas proporções adequadas e queimar essa mistura em grandes fornos rotativos até uma temperatura de cerca de 1450 °C. Nessa temperatura, o material sofre uma fusão incipiente precipitando-se em pelotas, conhecidas como "clínquer". O clínquer é resfriado e moído até um pó bem fino, adicionando-se então pequena quantidade de gesso (para evitar que o cimento apresente pega excessivamente rápida ao se hidratar), resultando o cimento Portland largamente usado em todo o mundo. (NEVILLE, 1997)⁴⁶

Algumas adições podem ser incorporadas ao clínquer durante a moagem, para a obtenção de cimentos com propriedades específicas. Entre estas adições destacam-se as escórias de alto forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos. Por questões econômicas, o uso do gesso está sendo substituído pela utilização da anidrita (CaSO_4) ou pela adição de uma mistura de gesso e anidrita. (AITCIN, 2000)¹³

Durante a formação do clínquer, toda a cal deve se combinar com os componentes da argila para formar os silicatos e aluminatos de

cálcio. O endurecimento, após a adição de água, se dá com a hidratação destes silicatos e aluminatos, formando uma estrutura cristalina rígida.

Todos os compostos presentes no clínquer são anidros, porém, reagem quando em contato com a água e formam compostos hidratados estáveis, resultantes de reações exotérmicas. Portanto, o cimento Portland é constituído por vários compostos (silicatos e aluminatos de cálcio), dos quais quatro são os mais importantes, conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.7 – Compostos principais do cimento Portland

Composto	Constituição química	Fórmula simplificada	Teores presentes
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	42 a 60%
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	10 a 35%
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 a 13%
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5 a 12%

As propriedades dos principais componentes são:

- C_3S – É o principal constituinte do cimento Portland. Apresenta início e fim de pega em poucas horas, apresentando resistência à compressão de cerca de 70 MPa em 360 dias. Apresenta médio calor de reação.
- C_2S – Segundo principal constituinte do cimento Portland. Apresenta duração de pega não definida e pouca resistência aos 28 dias, no entanto, após 2 anos apresenta resistência equivalente ao C_3S . Sua presença é benéfica para o aumento da resistência por envelhecimento. Apresenta baixo calor de reação.

- C_3A – Apresenta alto calor de reação, portanto sua presença deve ser controlada na utilização em grandes volumes. Apresenta pega rápida e baixa resistência à compressão. Também, apresenta baixa resistência química a águas agressivas. Seu teor deve ser controlado, porém sua presença é inevitável devido ao processo de fabricação.
- C_4AF – Apresenta pega mais lenta e resistência à compressão menor que o C_3A . Sua hidratação desenvolve baixo calor de reação. É mais resistente que o C_3A a águas agressivas e sua presença é considerada menos prejudicial que o C_3A .

Além destes quatro principais compostos, outros podem estar presentes na composição do cimento Portland:

- SO_3 (sulfatos): Originários do gesso adicionado para retardar a pega. Pode estar presente em teores máximos de 3%. Em excesso, pode formar Sulfoaluminato de Cálcio (etringita), que é prejudicial por promover expansão volumétrica e perda de resistência mecânica.
- MgO (magnésia): Originária do calcário, sob a forma de Dolomita ($MgCO_3$), e da argila. Pode estar presente em teores entre 0,8% e 5%. Não participa de nenhuma reação, em excesso pode causar instabilidade no volume (aumento).
- K_2O e Na_2O (álcalis): São utilizados como fundentes durante o processo de fabricação do cimento Portland. Aceleram a pega e seus teores admissíveis variam entre 0,3% e 2%. Sua presença, em

certas condições, pode propiciar a reação álcali-agregado (álcali-sílica), que é indesejável, pois causa expansão volumétrica.

- TiO_2 , Mn_3O_4 , P_2O_4 : São considerados impurezas e devem estar presentes em baixo teor.

Como vimos, características do cimento Portland comum podem ser modificadas a fim de conferir diferentes propriedades, para uma aplicação específica. Dessa maneira, são produzidos no Brasil os cimentos Portland com adições ou especiais, tipificados e especificados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), conforme a seguir:

- CP I – S: cimento Portland comum, com adições de pozolana entre 1% e 5%;
- CP II – E: cimento Portland composto com escória (até 34%);
- CP II – Z: cimento Portland composto com pozolana (até 14%);
- CP II – F: cimento Portland composto com filler, material carbonático, principalmente carbonatos de cálcio (6% a 10%);
- CP III : cimento Portland de alto-forno (adição de escória de 35% até 70%);
- CP IV : cimento Portland pozolânico (adição de pozolanas de 15% até 50%);
- CP V ARI : cimento Portland de alta resistência inicial.

2.4.2. AGREGADOS

Freqüentemente os agregados são considerados como um material de enchimento inerte do concreto e argamassa por não fazerem parte das reações químicas complexas com a água. No entanto, devido ao crescente conhecimento a cerca do papel desempenhado por eles na determinação de muitas propriedades importantes desses materiais, este ponto de vista tradicional vem sendo seriamente questionado. (MEHTA & MONTEIRO, 1994)⁴⁴

Por serem materiais baratos, os agregados incorporam a economia como sua principal função na composição dos concretos e argamassas. Porém, suas funções são ampliadas quando consideramos as propriedades finais desses sistemas. Os agregados ajudam a aumentar a estabilidade (redução da retração) e a resistência, principalmente ao desgaste ao fogo e à abrasão, além de influenciar na condutividade térmica. (ARAÚJO et al., 2000)¹⁷

De uma maneira geral, os agregados são classificados de acordo com a dimensão das partículas, massa específica e origem.

Quanto à dimensão das partículas constituintes, os agregados são divididos em dois grupos: agregados miúdos e agregados graúdos. Segundo a ABNT NBR 7211², o agregado miúdo é definido como a “areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075mm”; já os agregados graúdos correspondem ao “pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou

a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8mm".

Quanto à massa específica, os agregados são classificados como: leves, normais e pesados. São considerados agregados leves aqueles que possuem massa específica menor que 2000 Kg/m^3 ; os agregados normais são os que possuem massa específica variando entre 2000 Kg/m^3 e 3000 Kg/m^3 ; o grupo dos agregados pesados compreende aqueles com massa específica superior a 3000 Kg/m^3 .

De acordo com a origem ou modo de obtenção, os agregados podem ser considerados naturais ou artificiais. Os agregados naturais compreendem os que procedem de jazidas naturais, de forma pronta para utilização. Os artificiais envolvem os agregados que passam por qualquer processo de transformação a fim de atingirem as condições adequadas ao uso.

Conforme MEHTA & MONTEIRO (1994)⁴⁴, as propriedades dos agregados são divididas em dois grupos, de acordo com a forma com que afetam as propriedades da argamassa ou do concreto: proporções de dosagem e comportamento nos estados fresco e endurecido. Dessa maneira, devido à sobreposição desses dois aspectos, torna-se mais apropriado dividir as propriedades nos seguintes grupos:

- a) características dependentes da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade;

- b) características dependentes das condições prévias de exposição e condicionantes de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas;
- c) características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.

2.4.2.1. Composição granulométrica

O termo composição granulométrica corresponde à operação simples de separar uma amostra de agregado em frações, cada uma delas constituída de partículas com tamanhos iguais. Na prática, cada fração de agregado contém partículas entre determinados limites estabelecidos de acordo com as aberturas de peneiras padronizadas. (NEVILLE, 1997)⁴⁶

No Brasil, o ensaio para determinação da composição granulométrica dos agregados está regulamentado pela *NBR7217/1987-Agregados – Determinação da composição granulométrica*. A classificação do agregado, de acordo com a composição granulométrica, está estabelecida na *NBR7211/2005 - Agregado para concreto*, através do cumprimento de determinados limites.

Segundo METHA & MONTEIRO (1994)⁴⁴, dentre as várias razões para se especificar a granulometria de um agregado, destaca-se a sua grande influência na trabalhabilidade e custo de argamassas e concretos. NEVILLE (1997)⁴⁶ sugere que os fatores determinantes da granulometria são: a área superficial do agregado, o volume relativo

ocupado pelo agregado, a trabalhabilidade da mistura e a tendência à segregação.

2.4.2.2. Substâncias deletérias

Num contexto amplo, podemos definir as substâncias deletérias ou nocivas como aquelas que estão presentes como constituintes minoritários nos agregados, mas que são capazes de prejudicar a trabalhabilidade, a pega e o endurecimento e as características de durabilidade das argamassas ou concretos. (MEHTA & MONTEIRO, 1994)⁴⁴

Segundo NEVILLE (1997)⁴⁶ há três grandes categorias de substâncias deletérias que podem ser encontradas nos agregados: impurezas que interferem no processo de hidratação do cimento; películas que impedem a aderência efetiva entre o agregado e a pasta de cimento hidratada; e algumas partículas que são fracas ou não são.

As possíveis substâncias deletérias encontradas nos agregados são:

a) argila em torrões e materiais friáveis: são partículas presentes nos agregados capazes de serem desfeitas apenas com uma simples pressão entre os dedos polegar e indicador. O método de ensaio para determinação da quantidade desses materiais presentes nos agregados é descrito pela *ABNT NBR7218-Agregados-Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis (1987)*. O valor limite estabelecido pela NBR7211 é de 1,5% da massa do agregado para

agregados miúdos e de até 3,0% para agregados graúdos (neste caso, o limite depende da aplicação do concreto);

b) materiais pulverulentos: são partículas minerais, inclusive as solúveis em água, com dimensão inferior a 0,075mm presente nos agregados. A determinação da quantidade desses materiais presentes nos agregados é descrita na *ABNT NBR7219-Agregados-Determinação do teor de materiais pulverulentos (1987)*. O valor limite admitido pela NBR7211² é de 5,0% para os agregados miúdos e 1,0% para os agregados graúdos.

c) impurezas orgânicas: em geral, são detritos de origem vegetal, encontrados nos agregados miúdos sob a forma de partículas minúsculas, que em grande quantidade podem escurecer o agregado. Sua determinação está regulamentada pela *NBR NM 49/2001-Agregado fino-Determinação de impurezas orgânicas*. Segundo a NBR7211², quando o agregado miúdo for submetido a este ensaio, ele não deverá apresentar uma solução mais escura do que a solução padrão estabelecida. Caso ela seja mais escura, a utilização deste agregado fica condicionada ao resultado do ensaio previsto na *ABNT NBR7221-Agregados-Ensaio de qualidade de agregado miúdo (1987)*, onde são comparados resultados de resistência à compressão de argamassas elaboradas com o agregado miúdo suspeito e argamassas feitas com o mesmo agregado, porém lavado.

d) materiais carbonosos: a presença de materiais carbonosos ou outros materiais de baixa densidade (partículas leves) em grandes quantidades pode perturbar o processo de hidratação da pasta de cimento

e, além de serem materiais moles, podem se expandir causando a desagregação de concretos. No entanto, como partículas discretas em até 0,25% da massa do agregado não têm efeito prejudicial sobre a resistência do concreto (NEVILLE, 1997)⁴⁶. No Brasil, a especificação ABNT NBR7211 (2005) estabelece os limites máximos de 0,5% da massa do agregado para concretos cuja aparência é importante e 1,0% para os demais concretos.

2.4.3. QUALIDADE DA ÁGUA DE AMASSAMENTO

A quantidade de água utilizada na composição de argamassas e concretos influi na resistência mecânica. Quanto menor a relação água/cimento, em massa, maior a resistência obtida. Entretanto, a qualidade da água de amassamento também tem um papel importante na qualidade do produto final. Impurezas contidas na água podem influenciar negativamente a resistência de argamassas e concretos, ou causar manchas na suas superfícies, no caso do concreto armado, podem provocar corrosão da armadura.

A água de amassamento não deve conter matérias orgânicas indesejáveis, assim como substâncias inorgânicas em teores excessivos. No entanto, não existem normas muito explícitas sobre a qualidade da água, em parte porque ainda se desconhecem os limites de constituintes prejudiciais, mas principalmente porque restrições desnecessárias poderiam ser economicamente danosas. Em muitas especificações de obras, a qualidade da água é coberta por uma cláusula dizendo que a

água deve ser boa para beber. Uma água potável raramente contém sólidos inorgânicos dissolvidos em proporções maiores do que 2000 partes por milhão (ppm), e via de regra, menos do que 1000 ppm. Para uma relação água/cimento de 0,5, este último teor corresponde a uma quantidade de sólidos representando 0,05% da massa de cimento, assim seria pequeno qualquer tipo de efeito dos sólidos comuns. (NEVILLE, 1997)⁴⁶

Porém, algumas águas não adequadas para beber podem, muitas vezes, ser usadas satisfatoriamente para o preparo de concretos e argamassas. Segundo McCOY (1978) apud NEVILLE (1997)⁴⁶, “a cor escura ou o cheiro desagradável não significam necessariamente a presença de substâncias deletérias, geralmente, águas com pH de 6,0 a 8,0 são adequadas para o uso em concreto”.

Águas naturais ligeiramente ácidas não são prejudiciais, mas as que contêm ácido húmico e outros ácidos orgânicos podem interferir de modo prejudicial com o endurecimento de argamassas e concretos, assim como as águas excessivamente alcalinas.

A água não é prejudicial quando o teor de cloreto e de SO_3 não ultrapassarem 500 ppm e 1000 ppm, respectivamente. A norma BS 3148:1980 recomenda, também, o limite de 1000 ppm para carbonatos e bicarbonatos alcalinos. A literatura norte americana estabelece limites menos rigorosos. (NEVILLE, 1997)⁴⁶

De acordo com a *NBR6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento (2004)*, da ABNT, a água a ser empregada no preparo de

concreto deve ser isenta de teores prejudiciais de substâncias estranhas, presumindo-se satisfatórias as potáveis e as que possuam pH entre 5,8 e 8,0 e respeitem os seguintes limites máximos:

- matéria orgânica (expressa em oxigênio consumido)3 mg/l
- resíduo sólido500 mg/l
- sulfatos (expresso em íons SO_4)300 mg/l
- cloretos (expresso em íons Cl^-)500 mg/l
- açúcar5 mg/l

Importante salientar que os limites acima incluem as substâncias trazidas pelos agregados para a composição.

2.5. SÍLICA ATIVA

A sílica ativa é um subproduto da fabricação do silício metálico, das ligas de ferro-silício e de outras ligas de silício. O silício e as suas ligas são produzidos em fornos de arco elétrico imerso onde o quartzo é reduzido na presença de carvão. Durante a redução da sílica, dentro do arco elétrico, um subóxido de silício (SiO) é produzido. Como esse gás escapa para a parte superior da carga, ele se resfria, condensa e oxida na forma de partículas finíssimas de sílica (SiO_2). Essas partículas são coletadas por um sistema de eliminação de pó também chamado “câmara de filtros”.

Do ponto de vista químico, a sílica ativa é composta principalmente de SiO_2 . O teor de SiO_2 da sílica ativa varia, dependendo

do tipo de liga produzida. Quanto maior o teor de silício na liga, maior será o teor de SiO_2 da sílica ativa.

Quanto à forma estrutural, a sílica ativa é composta principalmente de sílica vítrea (amorfa). O resfriamento do vapor de SiO e a sua oxidação para SiO_2 acontecem tão rapidamente que o tetraedro do SiO_2 não tem tempo de se organizar ordenadamente para constituir a forma da sílica cristalina. (AITCIN, 2000)¹³

No que diz respeito às características físicas, as partículas de sílica ativa parecem perfeitamente esféricas, com diâmetros variando de menos de $0,1\mu\text{m}$ até $2\mu\text{m}$, de tal forma que a esfera média de sílica ativa é 100 vezes menor que a média das partículas de cimento. A massa específica da sílica ativa é aproximadamente $2,2\text{ g/cm}^3$. A área específica da sílica ativa não pode ser medida da mesma maneira usada para o cimento Portland devido à sua extrema finura, sendo determinada por adsorção de nitrogênio. Os valores típicos relatados estão numa faixa de $15.000\text{ m}^2/\text{Kg}$ a $25.000\text{ m}^2/\text{Kg}$. Usando-se a mesma técnica, a área específica de um cimento Portland comum é de aproximadamente $1.500\text{ m}^2/\text{Kg}$. (AITCIN, 2000)¹³

A sílica ativa é disponível atualmente em quatro diferentes formas: em bruto (como produzida), em forma de nata de sílica ativa, em forma densificada e misturada com cimento Portland.

Comparada com outros materiais cimentícios suplementares, as características peculiares que tornam a sílica ativa um material

pozolânico são o seu alto teor de SiO_2 , o seu estado amorfo e a sua extrema finura.

O efeito pozolânico trata-se da reação química da sílica ativa (SiO_2), na presença de umidade, com o hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, produzido na hidratação do cimento, resultando na formação de silicatos hidratados de cálcio (C-S-H), com capacidade cimentante, isto é, quando o cimento Portland é combinado com partículas ultrafinas de sílica ativa com baixa relação água/cimento (em massa), a microestrutura de tal sistema consiste principalmente de hidratos pouco cristalinos, formando uma matriz mais densa e de baixa porosidade. O aumento da quantidade de C-S-H produz uma matriz de alta resistência e uma obstrução dos poros, efeitos esses que reduzem a permeabilidade de pastas, argamassas e concretos.

Os efeitos benéficos da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades da pasta de cimento Portland não se limitam à rápida reação pozolânica, mas também ao efeito físico das partículas da sílica ativa, conhecido como “efeito fíler”. Devido à sua finura, as partículas de sílica ativa podem preencher os vazios entre as partículas maiores do cimento. Portanto, devido às suas características físicas únicas, a matriz sólida resultante que inclui sílica ativa é densa ainda antes que quaisquer ligações químicas entre as partículas do cimento tenham se desenvolvido. (AITCIN, 2000)¹³

Como as partículas de sílica ativa convencionais são cerca de 100 vezes menores que os grãos de cimento, elas são facilmente

introduzidas dentro dos espaços entre os grãos de cimento (interstícios). Esse efeito filler reduz os espaços disponíveis, os quais, sem a presença da sílica ativa, seriam ocupados pela água. Portanto, a presença de sílica ativa na pasta, argamassa ou concreto, promove um aumento da compacidade, tornando a mistura muito mais densa. Além disso, reduz a velocidade do fluxo interno de líquido na pasta, aumenta a coesão interna, aumenta o número de sítios de nucleação e aumenta a ligação dos grãos de cimento e das partículas de sílica ativa com os produtos de reação.

Ainda segundo AITCIN (2000)¹³, devido ao tamanho extremamente reduzido de suas partículas, a adição de sílica ativa reduz drasticamente tanto a exsudação interna como superficial da mistura. Essa exsudação reduzida é muito importante do ponto de vista microestrutural, porque transforma radicalmente as características microestruturais da zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados.

Portanto, a sílica ativa produz um melhor empacotamento e preenchimento dos vazios, na interface cimento-agregado, proporcionando uma maior compacidade localizada, ou seja, uma ligação mais eficiente entre a pasta e o agregado. GOLDMAN & BENTUR (1989), LARBI & BIJEN (1990) e BIJEN & SELST (1993) apud AITCIN (2000)¹³ confirmam que uma maior compacidade na interface pasta-agregado é alcançada com um decréscimo do teor de hidróxido de cálcio na região, devido às reações pozolânicas.

A combinação desses diferentes modos de ação da sílica ativa resulta numa microestrutura muito densa, com uma ligação íntima entre os agregados e a pasta de cimento hidratada. Assim, a sílica ativa aumenta a resistência à compressão de argamassas e concretos de cimento Portland. Além disso, como a sílica ativa reduz a porosidade da pasta de cimento, a permeabilidade da matriz é muito reduzida. Portanto, a presença de sílica ativa na composição de argamassas e concretos propicia a obtenção de materiais bastante resistentes e com excelente durabilidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. INTRODUÇÃO

A princípio, o resíduo sólido industrial, objeto principal da presente pesquisa, não pode ser considerado como uma matéria-prima tradicional. Portanto, com o objetivo de utilizar os blocos monolíticos provenientes do processo de solidificação/estabilização (S/S) em matrizes modificadas de cimento Portland na execução de alvenarias, para a determinação de algumas características técnicas, tanto do resíduo, como das argamassas com ele compostas e, também, dos tijolos maciços obtidos, foram empregadas normas e especificações não exatamente elaboradas para esse tipo de material, porém correlatas e coerentes com as finalidades requeridas. As análises técnicas foram totalmente fundamentadas em resultados empíricos, os quais foram comparados com os critérios estabelecidos pelas especificações brasileiras referentes.

Em geral, a literatura referente estabelece três parâmetros considerados importantes na avaliação dos blocos monolíticos resultantes da aplicação da técnica de S/S de resíduos sólidos contendo metais pesados através de matrizes cimentícias. O primeiro diz respeito à propriedade mecânica do bloco monolítico, avaliada através da resistência à compressão. O segundo envolve uma propriedade física estabelecida pela porosidade do material, verificada através do ensaio de absorção de água e permeabilidade. O terceiro caracteriza-se por uma propriedade química, a qual estabelece o grau de eficiência do processo de fixação dos constituintes perigosos do resíduo, avaliada através de ensaios de lixiviação e/ou solubilização.

Ao mesmo tempo, o processo S/S de resíduos sólidos, em matrizes aglomerantes, é uma técnica pouco difundida e pesquisada no Brasil, não dispondo de normas e procedimentos padronizados que regulamentem algumas das etapas da pesquisa, principalmente no que diz respeito à avaliação do sólido obtido, quanto à sua eficiência de estabilização dos metais presentes em excesso no resíduo sólido bruto e no que diz respeito ao desempenho do material aplicado em algum setor produtivo.

BRITO et al. (2004)²⁰ estabelecem que, mesmo considerando ser eminentemente do gerador a competência para o tratamento de resíduos sólidos industriais, a legislação ressenete-se de uma política nacional de resíduos sólidos industriais, bem como de normas gerais e de âmbito nacional, visando avaliar com critérios a tecnologia de

estabilização por solidificação. Portanto, é necessário estabelecer no Brasil critérios para a caracterização de produtos finais obtidos após aplicação da estabilização por solidificação de resíduos sólidos industriais em matrizes de cimento e/ou materiais com características solidificantes, além de diretrizes para disposição segura de produtos finais estabilizados por solidificação de acordo com os cenários apropriados para resíduos sólidos industriais.

3.1.1. AVALIAÇÃO MECÂNICA

Quanto à avaliação mecânica das matrizes solidificadas a presente investigação aplicou a norma *ABNT NBR7215 "Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão"* (1996), a qual estabelece a determinação através da aplicação de carga axial em corpos-de-prova cilíndricos.

3.1.2. AVALIAÇÃO FÍSICA

A avaliação física das matrizes solidificadas foi efetuada através da estimativa do grau de porosidade. Isso foi efetuado de duas maneiras: 1) determinação da absorção de água de corpos-de-prova cilíndricos, aplicando os procedimentos estabelecidos na norma *ABNT NBR9778 "Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água por Imersão"* (2005). 2) determinação da estimativa da permeabilidade ao ar, aplicando modelo e procedimentos propostos pela Norma ASTM C577-96¹⁶, utilizando equipamento apresentado nas Figuras

3.1 e 3.2 e com os dados experimentais ajustados segundo a equação de Forchheimer.

Figura 3.1 - Equipamento para determinação da permeabilidade ao ar

Figura 3.2 - Esquema do equipamento para determinação da permeabilidade

A permeabilidade é uma propriedade que tem despertado bastante interesse na tecnologia das argamassas e dos concretos, uma vez que determina a susceptibilidade destes materiais a processos de degradação por ataques químicos, quando submetidos a ambientes agressivos. Portanto, a estimativa da durabilidade de argamassas e

concretos está diretamente vinculada à sua permeabilidade, uma vez que determina a facilidade com que gases ou líquidos agressivos penetram e atacam suas estruturas. No caso de resíduos sólidos solidificados em matrizes de cimento, esta propriedade torna-se importante, pois determina o quanto as matrizes estarão sujeitas à degradação, no caso de deposição em aterros.

O conceito de permeabilidade surge naturalmente quando um fluido é forçado a atravessar um meio poroso. A complexa interação entre fluido e o canal poroso causa uma transformação na energia do sistema, geralmente associada à diminuição da pressão exercida pelo fluido. A permeabilidade é assim uma propriedade não apenas do meio poroso ou do fluido, mas também da interação dinâmica entre ambos (SCHEIDEGGER, 1974)⁵⁶.

Conforme INNOCENTINI e PANDOLFELLI (1999)³⁵, Darcy, em 1856, foi um dos primeiros a equacionar empiricamente a modificação na energia do fluido causada pela sua passagem através de um meio poroso. Trabalhando com meios granulares não-consolidados, Darcy propôs que, para baixas velocidades, o gradiente de pressão (dP/dx) de um fluido incompressível com viscosidade (μ) escoando com velocidade (V_s) através de um meio poroso, fosse dado por:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{K_1} V_s \quad [1]$$

A integração da equação [1] para a espessura (L) do meio poroso resulta em:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} V_s \quad [2]$$

O parâmetro K_1 , conhecido como constante de permeabilidade Darciana ou viscosa, é uma propriedade apenas da estrutura porosa. A equação [2], conhecida como Lei de Darcy para a permeabilidade, tem o grande mérito de ser simples e de separar as influências do fluido (μ), escoamento (V_s) e meio poroso (K_1). Por ser derivada de ensaios a baixas velocidades, no entanto, a Lei de Darcy considera unicamente os efeitos do atrito sobre a queda de pressão no filtro.

Ainda conforme INNOCENTINI e PANDOLFELLI (1999)³⁵, Reynolds, em 1900, e Forchheimer, em 1901, também trabalhando com meios granulares, perceberam que a Lei de Darcy não apresentava bons resultados com o aumento da velocidade do fluido. Ao invés de uma relação linear entre queda de pressão e velocidade, observaram uma relação parabólica, e associaram-na à variação da energia cinética de um fluido com densidade (ρ) durante seu escoamento pelo meio poroso, determinando a seguinte equação:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} V_s + \frac{\rho}{K_2} V_s^2 \quad [3]$$

A equação [3], conhecida como equação de Forchheimer, introduziu uma nova constante, K_2 , chamada de permeabilidade não-Darciana ou inercial, sendo também dependente apenas do meio poroso, onde o termo $\mu V_s / K_1$ representa os efeitos viscosos, enquanto o termo $\rho V_s^2 / K_2$ os efeitos cinéticos. O efeito viscoso causa perda de energia pelo

atrito entre as moléculas do fluido, enquanto o efeito cinético causa perda de energia pelo atrito entre o fluido e as paredes do meio poroso.

Para o ajuste das equações de permeabilidade, quando um gás é utilizado como fluido permeante, o fator da compressibilidade do gás deve ser considerado. Embora não ocorra para líquidos, uma descompressão ocorre quando um gás escoar através do meio poroso, ou seja, a velocidade do gás na entrada da amostra é menor do que na saída. Na prática, quanto menor a porosidade da estrutura ou maior a velocidade de escoamento, maior será a descompressão do gás, alterando a interação sólido-fluido e o perfil da curva de queda de pressão.

INNOCENTINI e PANDOLFELLI (1999)³⁵ consideram que “a inclusão da influência da compressibilidade do gás na equação de permeabilidade pode ser feita com a consideração do gás como sendo ideal”. A integração da equação diferencial de Fochheimer resulta deste modo em:

$$\frac{P_e^2 - P_s^2}{2PL} = \frac{\mu}{K_1} V_s + \frac{\rho}{K_2} V_s^2 \quad [4]$$

Onde, P_e e P_s são respectivamente as pressões absolutas na entrada e na saída da amostra, a pressão P corresponde à pressão na qual os parâmetros V_s , ρ e μ foram medidos ou calculados, ρ e μ são respectivamente a densidade e a viscosidade do ar, V_s é a velocidade superficial do ar, calculada pela divisão da vazão volumétrica (Q) pela área frontal e livre para escoamento (L).

INNOCENTINI e PANDOLFELLI (1999)³⁵ compararam as estimativas de permeabilidade de um concreto refratário, utilizando as equações de Darcy e Forchheimer, concluindo que a equação de Darcy desconsidera efeitos cinéticos/inerciais sobre a queda de pressão e, portanto, esta equação superestimar a permeabilidade quando acontece aumento significativo na velocidade do fluido. Além disso, os efeitos da densidade do fluido são apenas considerados pela equação de Forchheimer. Os autores ainda consideram que: "outras equações são encontradas na literatura, relacionando propriedades estruturais do material poroso com constantes de permeabilidade em situações específicas de escoamento (DULLIEN, 1979; D. RUTH, 1992). No entanto, a equação de Forchheimer, além de simples, é a que descreve de um modo mais geral os principais fatores que influenciam a permeabilidade de um fluido escoando por um meio poroso".

Ainda, INNOCENTINI et al. (2000)³⁶, em artigo publicado no Journal of the American Ceramic Society, concluem que a equação de Forchheimer para fluidos compressíveis é o melhor modelo para representar a permeabilidade ao ar em cerâmicas refratárias.

Na presente pesquisa e conforme INNOCENTINI et al. (2001)³⁷, as constantes de permeabilidade K_1 e K_2 , propriedades dependentes apenas do meio poroso, foram obtidas por ajuste dos dados experimentais de V_s versus $(P_e^2 - P_s^2)/2P_sL$ na equação [3], através do método dos mínimos quadrados. Em cada ensaio, os valores de pressão e vazão foram coletados em réplica para garantir a confiabilidade da curva.

Considerou-se $\mu_{ar}=1,8 \times 10^{-5}$ Pa.s e $\rho_{ar}=1,08$ Kg/m³, para T_{amb} variando entre 23°C e 27°C e $P_{atm}=P_s$ variando entre 690mmHg e 693mmHg, nos dias dos ensaios.

3.1.3. AVALIAÇÃO QUÍMICA

O processo para avaliar a estabilidade química da matriz cimentícia foi estabelecido através das considerações relatadas a seguir:

- MEANS et al. (1995)⁴³ afirmam que quando se utiliza a água pura como líquido lixiviante o meio se mostra mais agressivo e metais específicos presentes em determinados resíduos podem ser parcialmente ou totalmente solubilizados.

- SILVA et al. (2002)⁵⁹ apresentam os resultados de quatro tipos de ensaios, comparando a concentração de metais pesados presentes nos lixiviados. Esses resultados foram obtidos aplicando a norma ABNT NBR10005 (1987), outras duas de uso nos EUA (Toxicity Characteristic Leaching Procedure-TCLP e Multiple Extraction Procedure-MEP) e uma de uso na União Européia (Essai de Lixiviation – XP X 31-210), para um resíduo contendo cobre (Cu), cromo (Cr), cádmio (Cd), zinco (Zn) e chumbo (Pb), solidificado em matrizes de cimento Portland (tipo CP-II-E-32). Os procedimentos efetuados conforme NBR10005, TCLP e MEP utilizam o ácido acético como líquido lixiviante, enquanto o procedimento da Essai de Lixiviation (XP) emprega a água desionizada como líquido lixiviante. A análise dos resultados indica que a água desionizada mostrou ser mais agressiva do que os ácidos utilizados nos

outros testes e que a liberação dos metais em baixas concentrações acontecem quando o pH do lixiviante é mantido na faixa de 5 a 12.

- PABLOS (1995)⁴⁹ e OLIVEIRA (1996)⁴⁸ realizaram ensaios de lixiviação em matrizes solidificadas, empregando o mesmo resíduo e mesmo tipo de cimento da presente pesquisa, utilizando ácido acético como líquido lixiviante, conforme procedimentos da ABNT NBR10005 (1987), sendo que não foi detectado nenhum elemento excedendo os limites estabelecidos pela ABNT NBR10004 (1987).

- O mesmo comportamento é constatado através dos resultados obtidos nos ensaios realizados na presente pesquisa, visando caracterizar o resíduo sólido em estudo. No ensaio de lixiviação, do resíduo bruto conforme ABNT NBR10005 (2004)⁸, utilizando ácido acético como líquido lixiviante, os metais e outros elementos inorgânicos são liberados em concentrações abaixo daquelas recomendadas na ABNT NBR10004 (2004)⁷, o que remete a classificá-lo como “não perigoso”, enquanto que no ensaio de solubilização, conforme ABNT NBR10006 (2004)⁹, onde o líquido lixiviante utilizado é a água desionizada ou destilada, as concentrações de metais liberados (alumínio, ferro e cromo) excedem os limites estabelecidos na ABNT NBR10004 (2004), sendo assim caracterizado como “não inerte”.

Diante dessas considerações, a presente pesquisa adotou o ensaio estabelecido na norma *ABNT NBR10006 "Procedimento para obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos" (2004)*, para avaliar

quimicamente e verificar a eficiência de fixação dos metais na matriz solidificada.

3.2. ESTRUTURA METODOLÓGICA

Visando estabelecer uma linha de atuação da presente investigação e guiar os procedimentos a serem executados, foram estabelecidos os seguintes objetos de estudo, constituindo a estrutura metodológica da presente pesquisa:

- Conhecimento da fonte geradora;
- Conhecimento das características físico-químicas do resíduo;
- Caracterização do resíduo como agregado para a utilização na composição de argamassas de cimento Portland;
- Verificação das propriedades mecânica, física e química das argamassas compostas com resíduo, através da elaboração de composições preliminares;
- Determinação das composições com adições minerais;
- Verificação das propriedades mecânica, física e química das composições com adições minerais;
- Determinação das composições a serem utilizadas para a confecção dos tijolos maciços;
- Fabricação e determinação das propriedades mecânica, física e química dos tijolos maciços.

3.3. RESÍDUO SÓLIDO

3.3.1. Fonte Geradora

O resíduo sólido em questão é proveniente das areias de fundição aglomeradas com argila, empregadas na moldagem de peças metálicas, as quais são utilizadas por uma indústria localizada na cidade de São Carlos, Estado de São Paulo, Brasil, para a obtenção de alguns componentes utilizados no processo de fabricação de seus produtos. A empresa produz compressores herméticos para a aplicação em sistemas de refrigeração.

O setor de fundição da indústria atinge uma produção aproximada de 2500 toneladas de peças metálicas de ferro cinzento por mês. Para isso, gera cerca de 700 toneladas de resíduo sólido mensalmente proveniente do desmonte dos moldes de areia, as quais são estocadas, inicialmente, no pátio da empresa, para depois serem transportadas e depositadas em um aterro industrial, devidamente construído para essa finalidade.

A areia-base utilizada na composição das areias de fundição é do tipo silicosa, encontrada em jazidas da região e fornecida, com granulometria específica, pela Mineração Jundú.

A argila utilizada como aglomerante é a bentonita sódica ativada, fornecida principalmente pela Bentonit União Nordeste S.A.

Tabela 3.1 - Análise química da argila

Composto	Proporção em massa (%)
SiO ₂	63,40
Al ₂ O ₃	15,70
Fe ₂ O ₃	6,42
MgO	2,65
CaO	0,71
Na ₂ O	2,10
TiO ₂	0,65
K ₂ O	0,69

Fonte: especificação Bentonit União Nordeste S.A.

Para melhorar algumas características e propriedades dos moldes, exigidas pelo processo de fundição, é utilizado, como aditivo na composição das areias de fundição, o carvão mineral em pó, participando da mistura em pequenas proporções.

Ensaio realizado pela empresa, visando o controle de qualidade dos moldes, indicam que as areias de fundição empregadas possuem basicamente a seguinte composição:

Tabela 3.2 - Composição das areias de fundição

Componente	Proporção em massa (%)
Areia silicosa	83 a 89
Argila (bentonita)	8 a 13
Carvão mineral	0,6 a 1,0
Água	3

Fonte: Tecumseh do Brasil Ltda

Com o vazamento do metal líquido nos moldes, a areia de fundição passa por um processo de queima a uma temperatura próxima de 1400 °C. Nessa temperatura a areia-base não se funde, mantendo a estrutura granular cristalizada, porém grande parte da argila perde suas

características aglomerantes, transformando-se em material pulverulento inerte, ou aderindo aos grãos de areia.

A solidificação do metal envolve formação de gases, que são liberados passando através do molde, carregando consigo pedaços pequenos do metal utilizado, os quais solidificam-se dentro do molde e farão parte constituinte das areias de fundição de descarte.

A seguir, apresentamos um fluxograma simplificado para ilustrar o processo de fabricação de peças metálicas através do sistema de fundição, utilizado pela Tecumseh do Brasil Ltda, assim como, em quais etapas o resíduo é gerado.

Figura 3.3 - Fluxograma simplificado do processo de fundição e de geração do resíduo

Como podemos ver no fluxograma anterior, as areias de fundição usadas são reaproveitadas, através de um processo de recuperação e regeneração. A recuperação envolve o seu resfriamento e peneiramento, após a retirada das peças fabricadas. A regeneração consiste em adicionar areia nova, bentonita, carvão mineral e água nas quantidades requeridas.

As areias de fundição descartadas, ou seja, as que realmente se transformam em resíduo, são provenientes de pedaços dos moldes que desagregam durante o percurso nas esteiras rolantes e caem no chão, assim como do esvaziamento parcial do silo destinado ao armazenamento das areias usadas, o qual é efetuado quando o silo encontra-se excessivamente cheio.

3.3.2. Caracterização do resíduo sólido

Para o levantamento das características físico-químicas do resíduo e devida classificação, foram empregadas as especificações estabelecidas pela ABNT, como segue:

- NBR 10007 (2004) – Amostragem de resíduo sólido;
- NBR 10006 (2004) – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos;
- NBR 10005 (2004) – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos;
- NBR 10004 (2004) – Resíduos sólidos: classificação.

Segundo a norma ABNT NBR 10004 (2004), a classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A identificação dos constituintes, a serem avaliados na caracterização do resíduo, deve ser criteriosa e estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem.

Ao mesmo tempo, a NBR 10004 (2004), em seu anexo H, codifica e classifica alguns resíduos como “não perigosos” (classe II), excluídos aqueles contaminados por substâncias que apresentem características de periculosidade, os quais constam nos anexos C, D e E da mesma norma. Entre os resíduos sólidos considerados não perigosos encontra-se o resíduo gerado pelas areias de fundição, o qual recebe o código de identificação “A016”.

São considerados resíduos não perigosos e não inertes (classe II A) aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos perigosos (classe I) ou de resíduos inertes (classe II B). Ao mesmo tempo, os resíduos classificados como inertes são aqueles que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações

superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G da ABNT NBR 10004.

Os ensaios referentes foram realizados no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Para a obtenção do extrato solubilizado foi empregado o equipamento da Figura 3.4 e para a obtenção do extrato lixiviado o da Figura 3.5.

Figura 3.4 – Equipamento para obtenção do extrato solubilizado

Figura 3.5 – Equipamento para obtenção do extrato lixiviado

A análise dos extratos solubilizado e lixiviado foi efetuada utilizando espectrofotômetro de absorção atômica Intralab AA-1275, e apresentou os resultados apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4.

Tabela 3.3 – Análise do extrato solubilizado (ABNT)

Elemento	Unidade	Solubilização (mg/L)	Solubilização (mg/L) L.M.
Alumínio	mg Al/L	3,64	0,2
Arsênio	mg As/L	0,01	0,01
Bário	mg Ba/L	< 0,30	0,7
Cádmio	mg Cd/L	< 0,004	0,005
Chumbo	mg Pb/L	< 0,004	0,01
Cobre	mg Cu/L	0,263	2,0
Cromo Total	mg Cr/L	0,12	0,05
Ferro	mg Fe/L	3,31	0,3
Manganês	mg Mn/L	< 0,01	0,1
Mercúrio	mg Hg/L	< 0,001	0,001
Prata	mg Ag/L	< 0,009	0,05
Selênio	mg Se/L	< 0,003	0,01
Sódio	mg Na/L	71,2	200,0
Zinco	mg Zn/L	0,017	5,0
Cianetos	mg CN/L	< 0,042	0,07
Cloretos	mg Cl/L	61,3	250,0
Fenóis	mg C ₆ H ₅ OH/L	< 0,001	0,01
Fluoretos	mg F/L	0,19	1,5
Nitratos	mg N/L	< 0,85	10,0
Sulfatos	mg SO ₄ /L	53,0	250,0
Surfactantes	mg LAS/L	< 0,03	0,5

L.M.- Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

Tabela 3.4 – Análise do extrato lixiviado (ABNT)

Elemento	Unidade	Lixiviação (mg/L)	Lixiviação (mg/L) L.M.
Arsênio	mg As/L	< 0,001	1,0
Bário	mg Ba/L	< 0,03	70,0
Cádmio	mg Cd/L	< 0,004	0,5
Chumbo	mg Pb/L	< 0,044	1,0
Cromo Total	mg Cr/L	0,034	5,0
Mercúrio	mg Hg/L	< 0,001	0,1
Prata	mg Ag/L	< 0,009	5,0
Selênio	mg Se/L	< 0,003	1,0
Fluoretos	mg F/L	< 0,1	150,0

L.M.- Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

Os parâmetros que estão em desacordo com o Limite Máximo (L.M.) estabelecido pela ABNT NBR 10004 (2004), em seu anexo G, referente aos padrões para o ensaio de solubilização, estão grifados na Tabela 3.3.

Conforme resultados obtidos no ensaio de lixiviação, o resíduo sólido, objeto deste trabalho, é um resíduo considerado como “não perigoso” (classe II), e, conforme resultados do ensaio de solubilização, é definido como “não inerte”, sendo então caracterizado com classe II A.

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, do Estado de São Paulo, em Decisão de Diretoria nº 152/2007/C/E de 08 de agosto de 2007, publicou o documento intitulado “Procedimentos para Gerenciamento de Areia de Fundição” – CETESB (2007)²⁶, no qual, estabelece os seguintes procedimentos para avaliação de propostas de reutilização do resíduo areia de fundição:

a) o resíduo areia de fundição deverá ser classificado como classe II-A ou II-B, de acordo com a norma ABNT NBR 10004/2004.

b) o resíduo areia de fundição deverá apresentar concentrações de poluentes no extrato lixiviado, obtido conforme a norma ABNT NBR 10005/2004, menores ou iguais às concentrações constantes na tabela "Concentração máxima de poluentes no lixiviado".

c) o resíduo areia de fundição deverá apresentar concentrações de poluentes no extrato lixiviado neutro, obtido conforme "Metodologia para a obtenção de extrato lixiviado neutro na areia de fundição", menores ou iguais às concentrações máximas constantes na tabela "Concentração máxima de poluentes no lixiviado neutro". Sendo que, neste procedimento o resíduo areia de fundição deverá apresentar pH na faixa entre 5,0 e 10,0.

d) o extrato solubilizado do resíduo areia de fundição, obtido conforme procedimento descrito em "Solubilização aquosa de amostras de areia de fundição para teste de toxicidade aguda com *Vibrio fischeri*" não deve apresentar toxicidade. O teste deverá ser realizado de acordo com a norma técnica CETESB L5.227, em dose única máxima (81,9%), com 5 réplicas, e o resultado deverá ser expresso em porcentagem de inibição média e desvio padrão, após 15 minutos de inibição. As amostras que apresentarem a média da porcentagem de inibição superior a 20% serão consideradas como tóxicas.

O extrato lixiviado neutro foi obtido conforme os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR10005/2004, substituindo o ácido acético por água destilada como solução de extração.

A obtenção e a análise do extrato lixiviado neutro foram realizadas no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

Na Tabela 3.5 estão relacionados os resultados da análise do extrato lixiviado e na Tabela 3.6 os resultados da análise do extrato lixiviado neutro, ambas com as respectivas concentrações máximas estabelecidas pela CETESB (2007)²⁶.

O teste de toxicidade aguda com a bactéria luminescente *Vibrio fischeri*, para 5 amostras, apresentou média de inibição de 15,4% e desvio padrão de 1,67.

Tabela 3.5 – Análise do extrato lixiviado (CETESB)

Elemento	Lixiviação (mg/L)	Concentração Máxima (mg/L)
Arsênio	< 0,001	0,50
Bário	< 0,03	10,00
Cádmio	< 0,004	0,10
Chumbo	< 0,044	0,50
Cromo Total	0,034	0,50
Mercurio	< 0,001	0,02
Selênio	< 0,003	0,10

Tabela 3.6 – Análise do extrato lixiviado neutro (CETESB)

Elemento	Lixiviação Neutra (mg/L)	Concentração Máxima (mg/L)
Cloreto	38,0	2500,0
Cobre	0,07	2,5
Cianeto	< 0,001	2,0
Fluoreto	0,05	14,0
Ferro	14,30	15,0
Manganês	0,30	0,5
Níquel	< 0,008	2,0
Fenóis (total)	0,011	3,0
Sódio	44,0	2500,0
Sulfato	64,0	2500,0
Sulfito (total)	3,5	5,0
Sólidos Totais	1723,0	5000,0
Zinco	1,32	25,0
pH	6,85	

3.3.3. Caracterização do resíduo como agregado

A presente investigação adotou a técnica de estabilização por solidificação em matrizes de cimento Portland. Isso faz com que o resíduo passe a desempenhar o papel de agregado na composição de argamassas.

Além de desempenhar uma função econômica de máxima importância, pois geralmente é o elemento de custo mais baixo por unidade de volume nas argamassas, o agregado atua de forma decisiva no incremento de certas propriedades destas, assim como: resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade (BAUER, 1985)¹⁸. Portanto, fica estabelecida a importância do conhecimento do resíduo

como agregado e sua influência no desempenho das argamassas de cimento com ele compostas.

A qualidade dos agregados, utilizados na composição de argamassas de cimento Portland, pode ser avaliada através de algumas características da sua composição, principalmente no que diz respeito à quantidade de substâncias nocivas (materiais pulverulentos, torrões de argila, materiais carbonosos e impurezas orgânicas). Também, é importante conhecer alguns índices físicos (composição granulométrica, massa específica, massa unitária e teor de umidade), os quais auxiliam o estudo de dosagem das argamassas.

A caracterização do resíduo, como agregado, foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela *ABNT NBR 7211 (2005)- Agregados para concreto – especificação*. Todos os ensaios envolvidos nesta etapa foram realizados no Laboratório de Construção Civil do Departamento de Arquitetura e Urbanismo – EESC – USP.

Em todos os procedimentos realizados com a presença do resíduo, exceto nos relativos à sua classificação como resíduo sólido, o mesmo passou por um processo de secagem ao ar livre, através do seu espalhamento e exposição aos raios solares durante no mínimo seis horas. Após esta secagem, o resíduo sofreu um peneiramento, em peneira com malha de abertura 4,8 mm, sendo que somente ficaram retidos na peneira alguns poucos pedaços de metal, correspondente a aproximadamente 0,01% da massa total peneirada.

- **Teor de materiais pulverulentos**

O termo materiais pulverulentos designa todas as partículas minerais com dimensão inferior a 0,075 mm, inclusive os materiais solúveis em água. Quando presentes em grandes quantidades nos agregados podem prejudicar seu total envolvimento por parte da pasta de cimento, gerando regiões frágeis e de fácil segregação após o endurecimento. Além disso, afetam a trabalhabilidade da argamassa, passando a exigir uma maior quantidade de água de amassamento.

O ensaio para a determinação do teor de material pulverulento presente no resíduo foi realizado em acordo com o método de ensaio *ABNT NBR 7219 (1987) – Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos*, determinado para três amostras. Os resultados obtidos estão relacionados na tabela a seguir:

Tabela 3.7 – Teor de materiais pulverulentos

Amostra	Teor de materiais pulverulentos (%)
1	8,3
2	9,4
3	8,8
média	8,8

O teor de materiais pulverulentos, determinado para o resíduo, mostrou-se relativamente alto, caracterizando um fator potencialmente prejudicial para o desempenho das pastas de cimento Portland, quando voltadas para a utilização em concretos estruturais. A ABNT NBR 7211 estabelece um limite máximo de material pulverulento

igual a 3,0% para utilização em concretos submetidos ao desgaste superficial e 5,0% para os demais concretos.

- **Teor de torrões de argila e partículas friáveis**

Por torrões de argila e partículas friáveis, entendam-se as partículas presentes nos agregados suscetíveis de serem desfeitas pela pressão entre os dedos polegar e indicador, conforme *ABNT NBR 9935 (1987) – Agregados – Terminologia*. A presença excessiva desses materiais nos agregados afeta a trabalhabilidade e a resistência à abrasão das argamassas e concretos. A composição da areia de fundição e o seu manuseio tornam evidente a identificação desses elementos.

A determinação desse teor foi realizada de acordo com a *ABNT NBR 7218 (1987) – Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis*, executado para duas amostras. Os resultados obtidos estão relacionados na tabela a seguir:

Tabela 3.8 – Teor de argila em torrões e materiais friáveis

Amostra	Teor de argila em torrões (%)
1	10,3
2	10,9
média	10,6

O teor de argila em torrões e materiais friáveis, presente no resíduo, mostrou-se muito alto, podendo causar prejuízos na qualidade das matrizes de cimento Portland com ele compostas, uma vez que a

ABNT NBR 7211 (2005)² estabelece o teor de 1,5% como limite máximo para utilização em concretos estruturais.

- **Teor de materiais carbonosos**

Devido a dificuldades encontradas na execução do ensaio, referente à determinação do teor de materiais carbonosos (partículas leves), foi adotada a informação fornecida pelo departamento técnico do setor de fundição da empresa geradora do resíduo, portanto o teor estabelecido é:

Teor de materiais carbonosos: pode variar de 0,6% a 1,0%

Nesses níveis, o teor de materiais carbonosos não se apresenta como um fator prejudicial, visto que a *ABNT NBR 7211 (2005) – Agregado para concreto – especificação*, estabelece um limite máximo de 0,5% para concretos que exijam um bom acabamento superficial e de 1,0% para os demais concretos.

- **Teor de impurezas orgânicas**

A presença de impurezas orgânicas no agregado miúdo pode causar problemas de pega e de endurecimento nas pastas de cimento Portland. Este parâmetro foi quantificado através da análise de sólidos totais do resíduo, segundo procedimento estabelecido pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – APHA (1992)*.

Os resultados obtidos são os seguintes: (OLIVEIRA, 1996)⁴⁸

P_0 = peso da cápsula..... $P_0 = 103,80\text{g}$
 P_1 = peso da cápsula + resíduo..... $P_1 = 153,80\text{g}$
 $P_2 = P_1$ seco a 103°C $P_2 = 152,43\text{g}$
 $P_3 = P_2$ calcinado a 600°C $P_3 = 151,76\text{g}$
 $P_{\text{úmido}} = P_1 - P_0$ $P_{\text{úmido}} = 50,00\text{g}$
 $P_{\text{seco}} = P_2 - P_0$ $P_{\text{seco}} = 48,63\text{g}$
 $\%$ de umidade = $(1 - P_{\text{seco}}/P_{\text{úmido}}) \times 100$., %umidade = 2,74%
sólidos totais (ST) = $P_2 - P_0$ ST = 48,63g
sólidos totais fixos (STF) = $P_3 - P_0$ STF = 47,96g
sólidos totais voláteis (STV) = ST - STF.....STV = 0,67g
 $\%$ sólidos totais fixos = $(\text{STF}/\text{ST}) \times 100$%STF = 98,62%
 $\%$ sólidos totais voláteis = $(1 - \text{STF}/\text{ST}) \times 100$..%STV = 1,38%

A porcentagem de sólidos totais voláteis indica que o teor de matéria orgânica no resíduo é muito baixo. Portanto, esta pesquisa não levou em consideração a possibilidade de influência da matéria orgânica no desempenho das argamassas de cimento e resíduo.

- **Massa específica**

Massa específica é definida como a massa do material por unidade de volume. Este parâmetro é característico de cada material sendo de fundamental importância para o estudo de dosagem de argamassas e concretos e, também, para o cálculo do consumo de materiais.

A determinação da massa específica foi realizada de acordo com o método de ensaio *ABNT NBR9776 (1987) – Agregados* –

Determinação da massa específica de agregados miúdos através do frasco de Chapman.

Tabela 3.9 – Massa específica do resíduo

Amostra	Massa específica (Kg/L)
1	2,60
2	2,62
3	2,59
média	2,60

- **Massa unitária**

Massa unitária é definida como a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume, incluindo os vazios. O fenômeno da massa unitária surge porque não é possível empacotar as partículas dos agregados de tal forma que não haja espaços vazios. No Brasil, onde ainda é corrente a dosagem de argamassas e concretos em volume nos canteiros de obra, a massa unitária é uma informação necessária para a conversão dos traços em massa para volume.

O ensaio para a determinação da massa unitária do resíduo no estado solto foi realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos pelo método *ABNT NBR 7251 (1982) – Agregado no estado solto – Determinação da massa unitária – Método de ensaio.*

Tabela 3.10 – Massa unitária do resíduo no estado solto

Amostra	Massa unitária (Kg/L)
1	1,16
2	1,16
3	1,17
média	1,16

- **Teor de umidade**

Como já relatado, o resíduo utilizado nestes ensaios e na composição das argamassas foi previamente seco ao ar, portanto, apresentando um teor de umidade ainda retido em sua massa. A importância desta determinação está em poder corrigir a quantidade de água determinada para a composição das misturas.

Este parâmetro foi estabelecido através dos procedimentos do método de ensaio *ABNT NBR9939 (1987) – Agregados – Determinação do teor de umidade total por secagem*.

Tabela 3.11 – Teor de umidade total

Amostra	Teor de umidade (%)
1	2,16
2	2,08
3	2,11
média	2,12

- **Análise granulométrica**

A análise granulométrica envolve a determinação de três parâmetros relativos às partículas que compõe os materiais granulares:

composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura.

Composição granulométrica é a distribuição das partículas dos materiais granulares entre várias dimensões e é expressa em termos de porcentagens acumuladas em massa em cada uma das aberturas de uma série de peneiras. A dimensão máxima característica é designada pela dimensão da abertura da peneira na qual ficam retidos 5% ou menos das partículas. O módulo de finura é calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em cada uma das peneiras da série especificada, dividida por 100. A razão mais importante desta análise é sua influência na trabalhabilidade e no custo da argamassa.

O resíduo apresentou composição granulométrica homogênea em duas amostras ensaiadas (ANEXO A). Está classificada como uma **areia muito fina (zona 1)**, de acordo com os limites granulométricos da norma referente. A dimensão máxima característica é 1,2mm e o módulo de finura 1,77.

3.4. CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é um material de construção relativamente barato, além disso, é adaptável a uma ampla variedade de condições ambientais e praticamente isento de problemas maiores quando colocado em serviço de forma adequada.

No presente trabalho foi utilizado o cimento Portland do tipo composto com escória de alto forno até 34%, com classe de resistência à

compressão de 32 MPa aos 28 dias, o qual é denominado CP II E -32. A presença de escória de alto forno e o baixo teor de C_3A , faz com que este tipo de cimento possua um bom desempenho em ambientes agressivos, principalmente na presença de sulfatos.

Este tipo de cimento Portland desenvolve um calor de hidratação considerado médio, fator que não causa microfissuras excessivas no seu processo de início de pega e, ao mesmo tempo proporciona um tempo de fim de pega e de endurecimento não muito longo. Além disso, o cimento tipo CP II E -32 possui compatibilidade com outros componentes químicos, como aditivos e adições.

Foi utilizado o cimento CP II E -32 da marca Ciminas, produzido pela Holcim Brasil S.A., o qual possui as seguintes características:

Tabela 3.12 – Propriedades químicas do clínquer

Óxidos	Clínquer (%)
SiO ₂	21,09
Al ₂ O ₃	5,62
Fe ₂ O ₃	3,44
CaO	67,24
MgO	0,66
SO ₃	0,58
K ₂ O	0,76
Na ₂ O	0,03

Fonte: HOLCIM BRASIL, período 2005.

Tabela 3.13 – Composição do cimento

Proporções	CP II E -32 (%)
Clínquer	67,9
Escória	17,43
Sulfatos de cálcio	2,94
Fíler calcário	11,73

Fonte: HOLCIM BRASIL, período 2005.

Tabela 3.14 – Propriedades físicas do cimento CP II E-32

Propriedade	Valor
Área específica Blaine (m ² /Kg)	390
Início de pega (min)	173
Fim de pega (min)	242
Finura #200 (%)	2,5
Finura #325 (%)	15,1
Resistência compressão (MPa)	
1 dia	12,7
3 dias	26,5
7 dias	34,0
28 dias	44,0

Fonte: HOLCIM BRASIL, período 2005.

Tabela 3.15 – Composição potencial do cimento

Componente	Proporção (%)
C ₃ S	43,45
C ₂ S	8,28
C ₃ A	5,53
C ₄ AF	7,11

Fonte: HOLCIM BRASIL, período 2005.

3.5. SÍLICA ATIVA

A sílica ativa é um subproduto da fabricação de silício metálico ou de ligas de ferro-silício a partir de quartzo de elevada pureza e carvão em forno elétrico de eletrodos de arco submerso. Esse subproduto é um dióxido de sílica amorfa (SiO_2), a qual é gerada dentro dos fornos elétricos em arco durante a redução do quartzo puro. O SiO que se desprende na forma de gás se oxida e condensa em um material composto de partículas esféricas extremamente pequenas, com aspecto vítreo e muito reativas.

A adição de sílica ativa nas argamassas de cimento Portland contendo o resíduo sólido objetivou a obtenção de matrizes mais compactas e menos porosas, no sentido de melhorar a estabilização física dos metais presentes no resíduo.

A sílica ativa utilizada na presente pesquisa foi fornecida pela Empresa Microsílica Tecnologia Indústria e Comércio Ltda., e possui as seguintes características:

Tabela 3.16 – Propriedades químicas da sílica ativa

Óxidos	Sílica ativa (%)
SiO_2	94,3
Al_2O_3	0,09
Fe_2O_3	0,10
CaO	0,30
MgO	0,43
K_2O	0,83
Na_2O	0,27

Fonte: Microsílica Ltda, período 2003.

Tabela 3.17 – Propriedades físicas da sílica ativa

Massa específica	2150 a 2650 Kg/m ³
Massa unitária	200 a 700 Kg/m ³
Área específica	18000 m ² /Kg

Fonte: Microsílica Ltda, período 2003.

3.6. ARGILA

Como relatado, as argilas hidrofílicas e, em particular, as bentonitas sódicas possuem uma alta capacidade de troca catiônica, onde esses cátions trocáveis são principalmente Ca^+ , Na^+ , K^+ , H_3O^+ , Al^{+3} e Fe^{+3} . Portanto, possuem capacidade de adsorver cátions hidratados.

Por outro lado, GRIM (1978) apud HANNA (1996)³⁴, indicam que a adição de 1 a 2% de bentonita em concretos à base de cimento Portland pode melhorar as características de impermeabilidade e trabalhabilidade.

Portanto, a pesquisa procurou melhorar o desempenho das matrizes simples de cimento Portland, no que diz respeito à eficiência de estabilização química do resíduo, através da adição de 2% de argila hidrofílica do tipo bentonita sódica. A bentonita utilizada foi a do tipo Brasgel FF, fornecida pela Bentonit União Nordeste, a qual é a mesma empregada pela indústria geradora do resíduo na confecção dos moldes para fundição.

3.7. SOLIDIFICAÇÃO EM MATRIZES DE CIMENTO PORTLAND

As composições (traços) investigadas na presente pesquisa foram estabelecidas com base em dados de pesquisas anteriores desenvolvidas por PABLOS (1995)⁴⁹ e OLIVEIRA (1996)⁴⁸, realizadas com o mesmo resíduo sólido em questão, proveniente da mesma indústria geradora e utilizando matrizes simples de cimento Portland. Procuramos melhorar certas propriedades das matrizes e por conseqüência seu desempenho no que diz respeito à eficiência de fixação dos metais presentes no resíduo, através do emprego de adições minerais (argila bentonita sódica e sílica ativa) como parte constituinte das composições.

A quantidade de água presente nas misturas foi estabelecida através da determinação da umidade ótima de compactação (*ABNT NBR 12023 – Solo-cimento – Ensaio de Compactação, 1992*) para cada composição, uma vez que o processo de fabricação dos tijolos maciços utiliza o sistema de prensagem através de uma prensa hidráulica. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Nestes ensaios, a quantidade de água é especificada, em porcentagem de massa, em relação aos demais materiais secos presentes na composição.

3.7.1. COMPOSIÇÕES PRELIMINARES

Inicialmente, elaboramos argamassas nas proporções que estabeleceram traços em massa de cimento : resíduo de **1: 1**, **1: 3** e **1: 5**, tendo como objetivo investigar possíveis interferências do resíduo na

evolução da resistência à compressão das matrizes de cimento e, também, verificar a eficiência de fixação das matrizes de cimento com relação aos metais presentes em excesso no resíduo sólido.

- **COMPOSIÇÕES DE REFERÊNCIA**

Utilizando uma areia natural, com composição granulométrica (ANEXO A) semelhante à do resíduo, moldamos argamassas de referência, denominados como traços **CA**, visando especificamente o controle da evolução da resistência à compressão e da absorção de água ao longo do tempo, com as seguintes composições, em massa:

Tabela 3.18 – Composições de referência

Denominação	Cimento : Areia nova : Água		Água/Mat.sec. (%)
	traço	composição	
CA1	1 : 1 : 0,24	44,6% : 44,6% : 10,8%	12,2
CA3	1 : 3 : 0,50	22,2% : 66,6% : 11,2%	12,4
CA5	1 : 5 : 0,77	14,8% : 74% : 11,2%	12,9

- **COMPOSIÇÕES COM CIMENTO E RESÍDUO**

Utilizando cimento e resíduo, elaboramos argamassas, denominadas como **CR**, com as seguintes composições, em massa:

Tabela 3.19 – Composições com cimento e resíduo

Denominação	Cimento : Resíduo : Água		Água/Mat.sec. (%)
	traço	composição	
CR1	1 : 1 : 0,26	44,2% : 44,2% : 11,6%	12,8
CR3	1 : 3 : 0,52	22,1% : 66,3% : 11,6%	13,0
CR5	1 : 5 : 0,81	14,7% : 73,5% : 11,8%	13,5

As composições CA e CR foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão (*ABNT NBR7215 – Cimento Portland: Determinação da Resistência à Compressão*) e absorção de água (*ABNT NBR9778 – Argamassa e Concreto Endurecidos: Determinação da Absorção de Água por Imersão*). As composições CR foram submetidas ao ensaio de solubilização (*ABNT NBR10006 – Procedimento para Obtenção do Extrato Solubilizado*) e permeabilidade ao ar [ASTM C577 (1996)¹⁶].

Para a realização dos ensaios mecânicos e físicos, foram moldados 6 (seis) corpos-de-prova cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura para cada idade ensaiada, sendo 4 (quatro) para o ensaio de resistência à compressão e 2 (dois) para o ensaio de absorção de água. Os ensaios foram realizados nas idades de 28, 91 e 365 dias.

Os resultados completos referentes aos ensaios de resistência à compressão estão apresentados no ANEXO B.

Para a realização dos ensaios de solubilização, foram moldados 2 (dois) corpos-de-prova cilíndricos com 32mm de diâmetro e 64mm de altura. Os ensaios de solubilização foram realizados na idade de 28 dias.

3.7.2. RESULTADOS PRELIMINARES

- Argamassas compostas com cimento : areia nova (CA)

Tabela 3.20 - Resistência à compressão e absorção de água das composições CA1

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)	Absorção de Água (%)
28	27,6	7,54
91	35,8	7,21
365	39,4	7,10

Tabela 3.21 - Resistência à compressão e absorção de água das composições CA3

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)	Absorção de Água (%)
28	20,7	10,83
91	26,5	10,65
365	28,6	10,50

Tabela 3.22 - Resistência à compressão e absorção de água das composições CA5

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)	Absorção de Água (%)
28	11,6	12,54
91	14,0	11,80
365	15,1	11,62

- Argamassas compostas com cimento : resíduo (CR)

Tabela 3.23 - Resistência à compressão e absorção de água das composições CR1

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)	Absorção de Água (%)
28	23,0	8,04
91	28,9	7,86
365	31,5	7,80

Tabela 3.24 - Resistência à compressão e absorção de água das composições CR3

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)	Absorção de Água (%)
28	16,5	11,65
91	20,9	11,52
365	22,1	11,36

Tabela 3.25 - Resistência à compressão e absorção de água das composições CR5

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)	Absorção de Água (%)
28	8,8	14,92
91	10,7	14,58
365	11,6	14,63

As Figuras 3.6, 3.7 oferecem uma melhor visualização da evolução da resistência à compressão das matrizes CA e CR, a Figura 3.8 possibilita a comparação entre seus desempenhos mecânicos.

Figura 3.6 - Resistência à compressão das composições CA

Figura 3.7 - Resistência à compressão das composições CR

Figura 3.8 - Resistência à compressão das composições CAxCR

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de solubilização das matrizes tipo CR:

Tabela 3.26 - Análise do extrato solubilizado das composições CR1

Elemento	Solubilização (mg/L)	Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	
Al	0,38	0,2
Fe	nd	0,3
Cr total	nd	0,05

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

Tabela 3.27 - Análise do extrato solubilizado das composições CR3

Elemento	Solubilização (mg/L)	Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	
Al	0,84	0,2
Fe	nd	0,3
Cr total	0,08	0,05

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

Tabela 3.28 - Análise do extrato solubilizado das composições CR5

Elemento	Solubilização (mg/L)	Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	
Al	1,80	0,2
Fe	0,05	0,3
Cr total	0,10	0,05

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

3.7.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS PRELIMINARES

Através dos resultados apresentados, verificamos que as argamassas compostas com resíduo (CR) não sofreram prejuízo na evolução da resistência à compressão, porém apresentaram uma diminuição nos valores nominais em comparação com as argamassas compostas com areia nova (CA), cujas perdas variam de 17% a 25% de acordo com o aumento da relação resíduo/cimento.

Ao mesmo tempo, os resultados de absorção de água indicam que as argamassas compostas com resíduo (CR) apresentam um aumento da absorção em relação às argamassas compostas com areia nova (CA), variando de 7% a 19%.

Os ensaios de solubilização indicam que as matrizes elaboradas com as argamassas CR5 obtiveram resultados insatisfatórios no que diz respeito à eficiência de fixação dos metais presentes em excesso no resíduo sólido bruto, acreditamos que seja devido ao fato das composições terem uma elevada relação resíduo/cimento. Por outro lado, as argamassas CR1 e CR3, apesar de não apresentarem estabilização total, indicam razoável eficiência de fixação.

Portanto, estabelecemos a continuidade da investigação através da tentativa de melhorar o desempenho das matrizes CR1 e CR3, empregando a adição de argila bentonita sódica e/ou sílica ativa.

3.8. COMPOSIÇÕES COM ADIÇÕES MINERAIS

- **COMPOSIÇÕES COM CIMENTO, RESÍDUO E BENTONITA**

Utilizando cimento, resíduo e argila bentonita sódica, com a argila participando de todas as composições sempre na proporção de 2% em relação à massa do resíduo, elaboramos argamassas com as seguintes composições, em massa:

Tabela 3.29 – Composições com cimento, resíduo e bentonita

Denominação	Cimento : Resíduo : Bentonita : Água		Água/Mat.sec. (%)
	traço	composição	
CRB1	1 : 1 : 0,02 : 0,26	43,8% : 43,8% : 0,88% : 11,52%	13,0
CRB3	1 : 3 : 0,06 : 0,54	21,7% : 65,1% : 1,30% : 11,90%	13,3

- **COMPOSIÇÕES COM CIMENTO, RESÍDUO E SÍLICA**

Utilizando cimento, resíduo e sílica ativa, sendo que a sílica participa de todas as composições sempre na proporção de 10% em relação à massa de cimento, elaboramos argamassas com as seguintes composições, em massa:

Tabela 3.30 – Composições com cimento, resíduo e sílica

Denominação	Cimento : Resíduo : Sílica : Água		Água/Mat.sec. (%)
	traço	composição	
CRS1	1 : 1 : 0,10 : 0,30	41,6% : 41,6% : 4,16% : 12,64%	14,3
CRS3	1 : 3 : 0,10 : 0,60	21,3% : 63,9% : 2,13% : 12,67%	14,7

- **COMPOSIÇÕES COM CIMENTO, RESÍDUO, BENTONITA E SÍLICA**

Utilizando cimento, resíduo, bentonita e sílica ativa, sendo que a argila participa de todas as composições sempre na proporção de 2% em relação à massa do resíduo e a sílica participa de todas as composições sempre na proporção de 10% em relação à massa de cimento, elaboramos argamassas com as seguintes composições, em massa:

Tabela 3.31 – Composições com cimento, resíduo, bentonita e sílica

Denominação	Cimento : Resíduo : Bentonita : Sílica : Água		Água/Matsec (%)
	traço	composição	
CRBS1	1 : 1 : 0,02 : 0,10 : 0,31	41,2% : 41,2% : 0,82% : 4,12% : 12,66%	14,5
CRBS3	1 : 3 : 0,06 : 0,10 : 0,61	21,0% : 63,0% : 1,26% : 2,10% : 12,64%	14,8

Para a realização dos ensaios mecânicos e físicos, foram moldados 6 (seis) corpos-de-prova cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura para cada idade ensaiada, sendo 4 (quatro) para o ensaio de resistência à compressão e 2 (dois) para o ensaio de absorção de água. Os ensaios foram realizados nas idades de 28, 91 e 365 dias.

A moldagem dos corpos-de-prova e a execução dos ensaios de resistência à compressão das argamassas foram realizadas conforme procedimentos estabelecidos pela *ABNT NBR 7215 (1996) – Cimento Portland: determinação da resistência à compressão*. Os ensaios para a determinação da absorção de água foram realizados conforme estabelecido na norma *ABNT NBR 9778 (2005) – Argamassa e Concreto Endurecidos: determinação da absorção de água por imersão*. A

moldagem e os ensaios citados foram efetuados no Laboratório de Construção Civil do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da EESC – USP.

Para a realização dos ensaios de solubilização foram moldados 2 (dois) corpos-de-prova cilíndricos com 32mm de diâmetro e 64mm de altura, para cada idade ensaiada. Os ensaios de solubilização foram realizados nas idades de 28 e 365 dias.

As composições foram submetidas ao ensaio de solubilização conforme procedimentos estabelecidos na *ABNT NBR 10006 (2004) – Procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos*. A obtenção dos extratos solubilizados foi realizada no Laboratório de Resíduos Sólidos do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP.

As análises dos extratos solubilizados para a detecção dos elementos Ferro (Fe) e Cromo (Cr) foram efetuadas no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP, utilizando espectrofotômetro de absorção atômica Intralab AA-1275, com limite de quantificação de 0,005 mg/L.

As análises dos extratos solubilizados para a detecção do elemento Alumínio (Al) foram efetuadas no Laboratório de Química Ambiental do Departamento de Química e Física Molecular do IQSC – USP, utilizando espectrofotômetro de absorção atômica Hitachi Z-8200, com limite de quantificação de 0,055 mg/L.

3.9. FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS TIJOLOS MACIÇOS

A próxima etapa da pesquisa, ou seja, a fabricação dos tijolos maciços foi efetuada utilizando as composições de cimento e resíduo com adição de sílica ativa (CRS1 e CRS3), pois foram as composições que apresentaram os melhores desempenhos mecânico, físico e químico, dentre as composições investigadas.

O projeto dos tijolos maciços foi concebido, inicialmente, para ser utilizado na execução de alvenarias não-portantes (de vedação) em um sistema construtivo sustentável de moradias de interesse social, ora em desenvolvimento no Laboratório de Construção Civil do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, sob coordenação do Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira (FAPESP – Processo 01/12915-6). Ao mesmo tempo, o *design* estabelecido para os tijolos maciços proporciona modulação e encaixes que podem reduzir significativamente o consumo da argamassa de assentamento.

O processo de fabricação dos tijolos utilizou uma prensa hidráulica, com capacidade de prensagem de 3 toneladas, possibilitando a manutenção da regularidade dimensional do tijolo, assim como de suas características físicas.

Após a fabricação, os tijolos foram colocados em uma câmara úmida, permanecendo em processo de cura pelo período de 7 dias. A idade estabelecida para a realização dos ensaios mecânico, físico e solubilização foi de 28 dias.

Figura 3.9 - Fabricação dos tijolos em prensa hidráulica

Figura 3.10 - Tijolos fabricados com a composição CRS3

Os tijolos maciços foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão e absorção de água, de acordo com os procedimentos estabelecidos no método de ensaio *ABNT NBR8492 (1984)* – *Tijolo Maciço de Solo-Cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água*.

A verificação da estabilização dos metais presentes em excesso no resíduo bruto, no que diz respeito aos tijolos maciços, foi efetuada através do ensaio de solubilização estabelecido na *ABNT NBR10006 (2004)*.

4. RESULTADOS

4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS MATRIZES COM ADIÇÕES MINERAIS

Os resultados apresentados referem-se à média de 4 corpos-de-prova para cada idade estabelecida, sendo que os resultados completos constam do ANEXO B:

- Matrizes compostas com cimento : resíduo : bentonita

Tabela 4.1 - Resistência à compressão das composições CRB1

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)
28	18,3
91	20,6
365	21,4

Tabela 4.2 - Resistência à compressão das composições CRB3

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)
28	11,5
91	13,0
365	13,2

- Matrizes compostas com cimento : resíduo : sílica

Tabela 4.3 - Resistência à compressão das composições CRS1

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)
28	41,3
91	49,5
365	52,0

Tabela 4.4 - Resistência à compressão das composições CRS3

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)
28	32,8
91	40,1
365	41,8

- Matrizes compostas com cimento : resíduo : bentonita : sílica

Tabela 4.5 - Resistência à compressão das composições CRBS1

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)
28	20,5
91	24,6
365	25,8

Tabela 4.6 - Resistência à compressão das composições CRBS3

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)
28	14,2
91	15,7
365	16,5

Os resultados obtidos estão representados nas Figuras 4.1 e 4.2, incluindo os resultados obtidos nos ensaios preliminares, ou seja, das matrizes tipo CA e CR.

Figura 4.1- Resistência à compressão das composições com relação cimento/resíduo de 1:1

Figura 4.2- Resistência à compressão das composições com relação cimento/resíduo de 1:3

4.2.ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS MATRIZES COM ADIÇÕES MINERAIS

Os resultados referem-se à média de 2 corpos-de-prova para cada idade estabelecida:

- Matrizes compostas com cimento : resíduo : bentonita

Tabela 4.7 - Absorção de água das composições CRB1

Idade (dias)	Absorção de Água (%)
28	9,64
91	9,45
365	9,42

Tabela 4.8 - Absorção de água das composições CRB3

Idade (dias)	Absorção de Água (%)
28	12,80
91	12,35
365	12,30

- Matrizes compostas com cimento : resíduo : sílica

Tabela 4.9 - Absorção de água das composições CRS1

Idade (dias)	Absorção de Água (%)
28	3,96
91	3,51
365	3,46

Tabela 4.10 - Absorção de água das composições CRS3

Idade (dias)	Absorção de Água (%)
28	7,98
91	7,82
365	7,80

- Matrizes compostas com cimento : resíduo : bentonita : sílica

Tabela 4.11 - Absorção de água das composições CRBS1

Idade (dias)	Absorção de Água (%)
28	8,85
91	8,26
365	8,22

Tabela 4.12 - Absorção de água das composições CRBS3

Idade (dias)	Absorção de Água (%)
28	10,35
91	9,87
365	9,50

Os resultados obtidos estão representados nas Figuras 4.3 e 4.4, incluindo os resultados obtidos nos ensaios preliminares, ou seja, das matrizes tipo CA e CR.

Figura 4.3 - Absorção de água das composições com relação cimento/resíduo de 1:1

Figura 4.4 - Absorção de água das composições com relação cimento/resíduo de 1:3

4.3. PERMEABILIDADE DAS MATRIZES COM ADIÇÕES MINERAIS

Para a realização dos ensaios de permeabilidade, foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com 50mm de diâmetro e 25mm de altura, obtidos através de cortes transversais em corpos-de-prova com 50mm de diâmetro e 100mm de altura, excluindo 10mm das superfícies

inferior e superior. A secagem dos corpos-de-prova foi efetuada por imersão em sílica-gel, em recipiente tampado, conforme mostrado na Figura 4.5, por um período de 48 horas. Os ensaios foram realizados na idade de 28 dias.

Figura 4.5 – Secagem dos corpos-de-prova em sílica-gel

Em cada ensaio, os valores de pressão e vazão foram coletados em réplica para garantir a confiabilidade da curva. Considerou-se $\mu_{ar}=1,8 \times 10^{-5}$ Pa.s e $\rho_{ar}=1,08$ Kg/m³, para T_{amb} variando entre 23⁰C e 27⁰C e $P_{atm}=P_s$ variando entre 690mmHg e 693mmHg, nos dias dos ensaios.

Os resultados obtidos estão indicados na Tabela 4.13 e nas Figuras 4.6 e 4.7, incluindo as matrizes sem adição mineral (CR). As curvas obtidas constam no ANEXO C.

Tabela 4.13 – Permeabilidade ao ar das matrizes

Amostra	K_1 (m²)	K_2 (m)
CRBS1	3,35E-15	6,94E-12
CRB1	6,88E-17	6,18E-14
CR3	1,43E-16	2,42E-14
CRS3	5,57E-17	2,97E-15
CRBS3	5,38E-13	4,85E-09
CRB3	3,51E-13	2,25E-09

Figura 4.6 – Permeabilidade Darciana das matrizes **Figura 4.7 – Permeabilidade não-Darciana das matrizes**

Não foi possível estimar a permeabilidade ao ar das matrizes CR1 e CRS1, pois não ocorreu passagem de ar através das amostras, mesmo empregando a pressão máxima do equipamento (5,77 Bar), reduzindo a largura dos corpos-de-prova de 25mm para 12,5mm e ampliando o diâmetro útil de aplicação da pressão de 30mm para 40mm. Porém, isso indica que essas matrizes possuem permeabilidade ao ar menor do que a obtida para a matriz CRS3, a qual apresentou a menor permeabilidade entre todas as matrizes cujos ensaios foram realizados com sucesso.

4.4. SOLUBILIZAÇÃO DAS MATRIZES COM ADIÇÕES MINERAIS

- Matrizes compostas com cimento : resíduo : bentonita

Tabela 4.14 - Análise do extrato solubilizado das composições CRB1

Elemento	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	365 dias	
Al	0,12	nd	0,2
Fe	nd	nd	0,3
Cr total	nd	nd	0,05

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

Tabela 4.15 - Análise do extrato solubilizado das composições CRB3

Elemento	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	365 dias	
Al	0,11	nd	0,2
Fe	0,08	nd	0,3
Cr total	0,10	0,11	0,05

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

- Matrizes compostas com cimento : resíduo : sílica

Tabela 4.16 - Análise do extrato solubilizado das composições CRS1

Elemento	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	365 dias	
Al	nd	nd	0,2
Fe	nd	nd	0,3
Cr total	nd	nd	0,05

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

Tabela 4.17 - Análise do extrato solubilizado das composições CRS3

Elemento	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	365 dias	
Al	0,08	nd	0,2
Fe	nd	nd	0,3
Cr total	nd	nd	0,05

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

- Matrizes compostas com cimento : resíduo : bentonita : sílica

Tabela 4.18 - Análise do extrato solubilizado das composições CRBS1

Elemento	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	365 dias	
Al	nd	nd	0,2
Fe	nd	nd	0,3
Cr total	nd	nd	0,05

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

Tabela 4.19 - Análise do extrato solubilizado das composições CRBS3

Elemento	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M. (mg/L)
	28 dias	365 dias	
Al	0,08	nd	0,2
Fe	nd	0,12	0,3
Cr total	nd	nd	0,05

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

4.5. EFICIÊNCIA DE FIXAÇÃO DOS METAIS NAS MATRIZES

SOLIDIFICADAS

O objetivo principal no processo de solidificação/estabilização de um resíduo é verificar a capacidade de fixação, nas matrizes solidificadas, dos elementos presentes em excesso no resíduo bruto. Por isso, os ensaios que submetem essas matrizes a um contato dinâmico e estático com água destilada, ou desionizada, são as referências para análise do processo.

Portanto, consideramos importante explicitar a comparação entre os resultados do ensaio de solubilização do resíduo bruto (Tabela 3.3) e os resultados dos ensaios das matrizes solidificadas (Tabelas 4.14 a 4.19). Esta confrontação foi efetuada através da determinação da eficiência de fixação dos metais pelas matrizes, estimada através da equação [5], considerando a quantidade de resíduo presente nas composições.

$$E_f = \frac{C_r - C_m}{C_r} \times 100 \quad [5]$$

Onde:

E_f = eficiência de fixação do metal na matriz solidificada (%)

C_r = concentração do metal no extrato solubilizado do resíduo bruto (mg/L)

C_m = concentração do metal no extrato solubilizado da matriz solidificada (mg/L)

- Matrizes compostas com cimento : resíduo : bentonita

Tabela 4.20 - Eficiência de fixação das matrizes CRB1

Elemento	Solubilização resíduo bruto (mg/L)	Eficiência de fixação (%)	
		28 dias	365 dias
Al	3,64	92,6	100
Fe	3,31	100	100
Cr total	0,12	100	100

Tabela 4.21 - Eficiência de fixação das matrizes CRB3

Elemento	Solubilização resíduo bruto (mg/L)	Eficiência de fixação (%)	
		28 dias	365 dias
Al	3,64	95,3	100
Fe	3,31	96,3	100
Cr total	0,12	00,0	00,0

- Matrizes compostas com cimento : resíduo : sílica

Tabela 4.22 - Eficiência de fixação das matrizes CRS1

Elemento	Solubilização resíduo bruto (mg/L)	Eficiência de fixação (%)	
		28 dias	365 dias
Al	3,64	100	100
Fe	3,31	100	100
Cr total	0,12	100	100

Tabela 4.23 - Eficiência de fixação das matrizes CRS3

Elemento	Solubilização resíduo bruto (mg/L)	Eficiência de fixação (%)	
		28 dias	365 dias
Al	3,64	96,7	100
Fe	3,31	100	100
Cr total	0,12	100	100

- Matrizes compostas com cimento : resíduo : bentonita : sílica

Tabela 4.24 - Eficiência de fixação das matrizes CRBS1

Elemento	Solubilização resíduo bruto (mg/L)	Eficiência de fixação (%)	
		28 dias	365 dias
Al	3,64	100	100
Fe	3,31	100	100
Cr total	0,12	100	100

Tabela 4.25 - Eficiência de fixação das matrizes CRBS3

Elemento	Solubilização resíduo bruto (mg/L)	Eficiência de fixação (%)	
		28 dias	365 dias
Al	3,64	96,7	100
Fe	3,31	100	94,2
Cr total	0,12	100	100

4.6. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS TIJOLOS MACIÇOS

Para a verificação da resistência à compressão e da absorção de água dos tijolos maciços foram ensaiados 10 e 3 exemplares, respectivamente.

Figura 4.8 - Exemplar preparado para o ensaio de resistência à compressão

Figura 4.9 - Execução do ensaio de resistência à compressão

Tabela 4.26 – Resistência à compressão dos tijolos CRS1 (28 dias)

Exemplar	Carga de Ruptura (Kgf)	Resistência à Compressão (MPa)
01	20.900	6,7
02	21.840	7,0
03	21.210	6,8
04	22.460	7,2
05	21.850	7,0
06	20.590	6,6
07	21.520	6,9
08	22.770	7,3
09	21.200	6,8
10	22.150	7,1
Média	21.650	6,9
Desvio Padrão		0,22

Tabela 4.27 – Absorção de água dos tijolos CRS1 (28 dias)

Exemplar	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção de Água (%)
01	3.046,8	3.308,9	8,6
02	3.127,1	3.383,6	8,2
03	3.083,5	3.351,8	8,7
Média			8,5

Tabela 4.28 – Resistência à compressão dos tijolos CRS3 (28 dias)

Exemplar	Carga de Ruptura (Kgf)	Resistência à Compressão (MPa)
01	14.040	4,5
02	13.730	4,4
03	12.480	4,0
04	13.100	4,2
05	14.660	4,7
06	11.860	3,8
07	14.050	4,5
08	13.740	4,4
09	14.980	4,8
10	14.650	4,7
Média	13.729	4,4
Desvio Padrão		0,32

Tabela 4.29 – Absorção de água dos tijolos CRS3 (28 dias)

Exemplar	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção de Água (%)
01	3.036,6	3.391,9	11,7
02	2.967,2	3.287,6	10,8
03	2.983,5	3.323,6	11,4
Média			11,3

4.7. SOLUBILIZAÇÃO DOS TIJOLOS MACIÇOS

Para a realização dos ensaios de solubilização, os tijolos foram moídos e o material resultante foi peneirado em peneira com abertura de malha de 9,5mm, conforme procedimento estabelecido na ABNT NBR10006/2004⁹.

Tabela 4.30 - Análise do extrato solubilizado dos tijolos CRS1 (28dias)

Elemento	Solubilização (mg/L)	Solubilização L.M. (mg/L)
Al	nd	0,2
Fe	0,07	0,3
Cr total	0,08	0,05

nd – elemento não detectado

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

Tabela 4.31 - Análise do extrato solubilizado dos tijolos CRS3 (28dias)

Elemento	Solubilização (mg/L)	Solubilização L.M. (mg/L)
Al	0,12	0,2
Fe	0,20	0,3
Cr total	0,10	0,05

L.M. – Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004 (2004)

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

- **Quanto ao resíduo sólido**

O resíduo sólido constituído pelas areias de fundição aglomeradas com argila, empregado na presente pesquisa, apresentou caracterização que o classifica como “não perigoso e não inerte”, ou seja, Classe IIA, conforme ABNT NBR 10004 (2004). Ao mesmo tempo, atende os parâmetros estabelecidos pela CETESB, em “Procedimentos para o Gerenciamento de Areia de Fundição” (2007)²⁶, indicando a possibilidade de reciclagem do resíduo.

A análise dos extratos solubilizado e lixiviado neutro do resíduo apresentam quantidades de cloretos (61,3 mg/L e 38,0 mg/L) e sulfatos (53,0 mg/L e 64,0 mg/L) respectivamente, muito abaixo das estabelecidas pela ABNT NBR 7211 (2005) – Agregados – especificação, no que diz respeito às quantidades máximas presentes nos agregados para garantir a qualidade da água de amassamento, ou seja, cloretos – 500 mg/L e sulfatos – 300 mg/L.

- **Quanto às matrizes solidificadas**

A adição da argila bentonita sódica, na composição das matrizes de cimento e resíduo, causou uma queda da resistência à compressão e um aumento da absorção de água e da permeabilidade ao ar, quando comparadas às matrizes com cimento e resíduo.

Os resultados dos ensaios de solubilização indicaram que a composição CRB1 obteve excelente eficiência de fixação dos metais Al, Fe e Cr, entretanto a matriz CRB3 não apresentou boa eficiência para o metal Cromo. Ao mesmo tempo, os resultados de solubilização das matrizes CRB1 e CRB3 mostraram uma melhor eficiência de estabilização quando comparados com as matrizes CR1 e CR3.

As matrizes com adições de bentonita e sílica ativa indicaram uma pequena diminuição na resistência à compressão em relação às matrizes com cimento e resíduo. As matrizes CRBS1 apresentaram absorção de água e permeabilidade ao ar maior do que as matrizes CR1. Ao mesmo tempo, as matrizes CRBS3 indicaram uma diminuição na absorção de água em relação às matrizes CR3, porém apresentaram permeabilidade ao ar maior.

Quanto aos resultados de solubilização, tanto as matrizes CRBS1 como as CRBS3 apresentaram ótima eficiência de fixação dos metais Al, Fe e Cr.

A adição de sílica ativa proporcionou um aumento significativo na resistência à compressão das matrizes, tanto em relação às composições tipo CR quanto em relação às composições tipo CA. Ao mesmo tempo, os resultados de absorção de água e de permeabilidade ao ar indicaram que a sílica ativa promoveu uma grande diminuição dos dois parâmetros.

Os resultados de solubilização das matrizes CRS1 e CRS3 apresentaram uma excelente eficiência de fixação dos metais Al, Fe e Cr.

- **Quanto aos tijolos maciços**

Os tijolos maciços fabricados com as composições tipo CRS1 e CRS3 apresentaram resultados satisfatórios quanto aos requisitos mecânico e físico (resistência à compressão e absorção de água). A especificação ABNT NBR8491 (1984)⁴ estabelece as seguintes condições para a aceitação dos tijolos:

- A amostra ensaiada de acordo com a NBR8492⁵ não deve apresentar a média dos valores de resistência à compressão menor do que 2,0 MPa, nem valor individual inferior a 1,7 MPa.
- A amostra ensaiada de acordo com a NBR8492⁵ não deve apresentar a média dos valores de absorção de água maior do que 20%, nem valores individuais superiores a 22%.

A análise do extrato solubilizado dos tijolos maciços fabricados com as composições CRS1 e CRS3 indica a presença do metal Cr excedendo os limites máximos estabelecidos pela ABNT NBR 10004 (2004), o que não acontece na análise do extrato solubilizado das matrizes tipo CRS1 e CRS3, onde os metais Al, Fe e Cr são solubilizados em quantidades inferiores aos limites máximos.

6. CONCLUSÕES

- A adição de 2% (em relação à massa de resíduo) de bentonita sódica nas matrizes de cimento Portland contribui para o aumento da eficiência de fixação dos metais Al, Fe e Cr, comprovando a capacidade de adsorção dos metais por parte da argila. Por outro lado causa uma diminuição da resistência à compressão e um aumento da absorção de água e da permeabilidade ao ar. A composição CRB1 apresentou alta eficiência de estabilização e pode ser considerado um material inerte. Entretanto, a composição CRB3 apresentou excesso do elemento Cr na análise do extrato solubilizado, nas duas idades ensaiadas (28 e 365 dias), não podendo ser considerado um material inerte.

- A adição de 10% (em relação à massa de cimento) de sílica ativa nas matrizes de cimento Portland contribui para o aumento da resistência à compressão, para a diminuição da absorção de água e da permeabilidade ao ar e para o aumento da eficiência de fixação dos metais Al, Fe e Cr, em relação às matrizes compostas somente com cimento e resíduo. A composição tipo CRS1 apresentou 100% de eficiência de fixação para os metais Al, Fe e Cr, e pode ser considerado um material inerte, assim como a composição CRS3, apesar de apresentar eficiência de fixação de 97,8% para o metal Al na idade de 28 dias.

- A adição de argila e sílica ativa nas matrizes de cimento Portland contribui para o aumento da resistência à compressão e para a diminuição da absorção de água, porém contribui para o aumento da permeabilidade ao ar, com relação às matrizes CR. A composição CRBS1 apresentou 100% de eficiência de estabilização dos metais Al, Fe e Cr nas duas idades e pode ser considerado um material inerte. A composição CRBS3, apesar de não ter apresentado 100% de eficiência de estabilização para os metais Al (28 dias) e Fe (365 dias), a quantidade solubilizada destes metais manteve-se abaixo dos limites estabelecidos na ABNT NBR10004 (2004), podendo, também, ser considerado um material inerte.

- As composições com adição de sílica ativa tipo CRS1 e CRS3 foram as que apresentaram os melhores desempenhos mecânico, físico e químico, entre as composições investigadas.

- Os resultados de resistência à compressão e de absorção de água dos tijolos maciços fabricados com as composições CRS1 e CRS3 atendem plenamente os critérios de aceitação estabelecidos na especificação *ABNT NBR8491 (1984) – Tijolo Maciço de Solo-cimento - especificação*, comprovando a viabilidade técnica para a aplicação na execução de alvenarias.

- A análise do extrato solubilizado dos tijolos maciços fabricados com as composições tipo CRS1 e CRS3 apresentaram presença do metal Cr acima do Limite Máximo estabelecido pela ABNT NBR10004/2004, portanto não podem ser considerados materiais inertes. Entretanto, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, em publicação CETESB (2007)²⁶, não estabelece nenhuma restrição quanto ao desempenho químico das matrizes solidificadas, somente determina parâmetros de reutilização para o resíduo sólido areia de fundição.

- Os tijolos maciços fabricados com as composições CRS1 e CRS3 apresentaram menor resistência à compressão, maior absorção de água e maior presença dos metais Al, Fe e Cr no extrato solubilizado, com relação às matrizes CRS1 e CRS3. Portanto o equipamento utilizado na fabricação dos tijolos possui capacidade de prensagem e compactação menor do que a empregada na elaboração dos corpos-de-prova.

- Portanto, a presente pesquisa comprova a viabilidade técnica da reciclagem do resíduo sólido constituído pelas areias de fundição aglomeradas com argila, empregado nesta investigação, para a fabricação de tijolos maciços, visando aplicação na execução de alvenarias.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT; NBR 6118; **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. 2004.
2. _____; NBR 7211; **Agregados para Concreto - Especificação**. 2005.
3. _____; NBR 7215; **Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão**. 1996.
4. _____; NBR 8491; **Tijolo Maciço de Solo-cimento – Especificação**. 1984.
5. _____; NBR 8492; **Tijolo Maciço de Solo-cimento – Determinação da Resistência à Compressão e da Absorção de Água**. 1984.
6. _____; NBR 9778; **Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Imersão**. 2005.
7. _____; NBR 10004; **Resíduos Sólidos – Classificação**. 2004.
8. _____; NBR 10005; **Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos**. 2004.
9. _____; NBR 10006; **Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos**. 2004.
10. _____; NBR 10007; **Amostragem de Resíduos Sólidos**. 2004.
11. _____; NBR 12023; **Solo-cimento – Ensaio de Compactação**. 1992.
12. ADASKA, W.S.; **Solidification and Stabilization of Wastes Using Portland Cement**. Portland Cement Association, EB071, 2nd ed., Skokie, IL, 1998.
13. AÏTCIN, P.C.; **Concreto de Alto Desempenho**. PINI, São Paulo, 2000.
14. ALBERONI, V.G. & YOKOYAMA, L. & DWECK, J.; **Estudo de Processo de Solidificação/Estabilização de Resíduo Industrial Contendo Níquel**. V Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria, Anais, 2006.
15. AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS; ASTM C150; **Standard Specification for Portland Cements**. Philadelphia, 1991.
16. _____; ASTM C577; **Standard Test Method for Permeability of Refractories**. West Conshocken, PA., 1996.

17. ARAUJO, R.C.L. & RODRIGUES, F.H.V. & FREITAS, E.G.A.; **Materiais de Construção**. Seropédica: Editora Universidade Rural, Rio de Janeiro, 2000.
18. BAUER, L.A.F.; **Materiais de Construção**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., V. 1, 3ª ed., Rio de Janeiro, 1985.
19. BHATTY, J.I.; **Stabilization of Heavy Metals in Portland Cement, Sílica Fume / Portland Cement and Masonry Cement Matrices**. Portland Cement Association, RP348, Skokie, IL, 1999.
20. BRITO, A.L. & SOARES, S.R.; **Normas e Critérios para Avaliação da Tecnologia de Estabilização por Solidificação: Situação Brasileira**. VII Seminário Nacional de São Paulo, Anais v.1, n.1, CD-ROM, 2004.
21. BROSCHE, C.D. & RÉ, V.L.; **Areias de Fundição e Materiais de Moldagem**. IPT, Boletim n.54, São Paulo, 1965.
22. BROSCHE, C.D.; **Areias de Fundição**. Ed. Ideal, São Paulo, 1962.
23. BÜCHLER, P.M. & WARREN, D. & CLARK, A.I. & PERRY, R.; **The Use of Clay Liners in the Attenuation of the Organic Load of Vinasse in Developing Countries**. International Conference of Chemical in the Environment, Lisboa, 1986.
24. CLAUDIO, J.R.; **Resíduos Sólidos Perigosos – Solidificação de Lamas Tóxicas com Cimentos**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica – USP, São Paulo, 1987.
25. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB, **Resíduos Sólidos Industriais**. São Paulo, 1985.
26. _____; **Procedimentos para Gerenciamento de Areia de Fundição**. Decisão de Diretoria nº 152/2007/C/E. São Paulo, agosto/2007.
27. CONNER, J.R.; **Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
28. CONNER, J.R. & HOEFFNER, S.L.; **The History of Stabilization/Solidification Technology**. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, p. 325-396, EUA, 1998.
29. CONNER, J.R. & COTTON, S. & LEAR, P.R.; **Chemical Stabilization of Contaminated Soils and Sludges Using Cement By-products**. Cement Industry Solutions to Waste Management, Proceedings, p. 73, Calgary, 1992.
30. CONNER, J.R.; **Guide to Improving the Effectiveness of Cement-Based Stabilization/Solidification**. Portland Cement Association, EB211, Skokie, IL, 1997.

31. DANIALI, S.; **Solidification/Stabilization of Heavy Metals in Latex Modified Portland Cement Matrices**. Journal of Hazardous Materials, V. 24, n. 2-3, p. 225-230, 1990.
32. GRIM, R.E.; **Bentonites**. Elsevier Publishers, Amsterdam, 1978.
33. HANNA, R.A.; **Estudo em Escala de Laboratório da Fixação de Metais em Matriz de Cimento Tendo em Vista a Disposição Final de Rejeitos Industriais Perigosos**. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 1990.
34. _____; **Estudo da Estabilização por Solidificação de Produtos Tóxicos em Cimento Portland: Uma Análise em Nível Microestrutural**. Tese de Doutorado, EPUSP, São Paulo, 1996.
35. INNOCENTINI, M.D.M. & PANDOLFELLI, V.C.; **Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e Forchheimer**. Cerâmica, vol.45, p.292-293, São Paulo, 1999.
36. INNOCENTINI, M.D.M. & PARDO, A.R.F. & PANDOLFELLI, V.C.; **Influence of Air Compressibility on the Permeability Evaluation of Refractory Castables**. Journal of the American Ceramic Society. 83 [6], p.1536-1538, USA, 2000.
37. INNOCENTINI, M.D.M. & STUDART, A.R. & PILEGGI, R.G. & PANDOLFELLI, V.C.; **Permeabilidade de concretos refratários multifuncionais**. Cerâmica, vol.47, p.34-39, São Paulo, 2001.
38. INSTITUTO DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA - IETEC ; **Gestão de Resíduos Sólidos Requer Maior Atenção das Indústrias**. www.ietec.com.br, acesso em 03/05/2006.
39. KONDIC, V.; **Princípios Metalúrgicos de Fundição**. Ed. Polígono, São Paulo, 1973.
40. MACKAY, M. & EMERY, J.; **Stabilization/Solidification of Contaminated Soils and Sludges Using Cementitious Systems**. Cement Industry Solutions to Waste Management, Proceedings, p. 135, Calgary, 1992.
41. MARAGNO, A.L.F.C.; **Solidificação de Lodo ao Cromo de Curtume em Matriz de Cimento**. Tese de Doutorado, EESC-USP, 1999.
42. McBRIDE, M.B. & PINNAVAIA, T.J. & MORTLAND, M.M.; **Adsorption of Aromatic Molecules by Clays in Aqueous Suspension**. Advanced Environmental Science Technology, V. 8, p. 145, 1985.
43. MEANS, J.L. & SMITH, L.A. & NEHRING, K.W. & BRAUNING, S.E. & GAVASKAR, A.R. & SASS, B.M. & WILES, C.C. & MASHNI, C.I.; **The Application of Solidification/Stabilization to Waste Materials**. Lewis Publishers, Boca Raton, 1995.

44. MEHTA, P.K. & MONTEIRO, P.J.M.; **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. PINI, São Paulo, 1994.
45. MERRITT, S.D. & BATCHELOR, B.; **Applications of Soil and Cement Chemistry to Stabilization/Solidification**. Transportation Research Record, n.1424, p. 1-7, 1993.
46. NEVILLE, A.M.; **Propriedades do Concreto**. Tradução: Salvador E. Giammusso, PINI, 2ª Edição, São Paulo, 1997.
47. OLIVEIRA, K.D.; **Disposição de Rejeitos Perigosos: Estudo em Escala de Laboratório da Solidificação/Estabilização de Rejeitos Fenólicos em Cimento Portland e Argilas Organofílicas**. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 1992.
48. OLIVEIRA, R.C.; **Encapsulamento de Areia de Fundação de Descarte em Matriz de Cimento**. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, 1996.
49. PABLOS, J.M.; **Utilização do Resíduo Sólido Gerado pelo Descarte das Areias de Fundação Aglomeradas com Argila no Setor de Construção Civil**. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, 1995.
50. PEREIRA, R.L.; **Curso de Fundição**. EESC-USP, São Paulo, 1991.
51. PETRUCCI, E.G.R.; **Materiais de Construção**. Ed. Globo, São Paulo, 1993.
52. PINTO, C.A.; **Estabilização por Solidificação em Cimento do Resíduo do Curtimento de Couro Contendo Cromo**. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 2001.
53. POON, C.S. & CLARK, A.I. & PERRY, R.; **Permeability Study on the Cement Based Solidification for the Disposal of Hazardous Wastes**. Cement and Concrete Research, V. 16, p. 161-172, EUA, 1986.
54. SAITO, L.M. & LEÃO, M.L.G. & NETO, P.P.C.; **Encapsulamento de Resíduos Industriais Perigosos**. 13^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais, Maceió, 1985.
55. SANTOS, P.S.; **Tecnologia de Argilas**. Edgard Blücher/EPUSP, São Paulo, 1992.
56. SCHEIDEGGER, A.E.; **The physics of flow through porous media**. University of Toronto Press, 3rd Edition, 353p, Canadá, 1974.
57. SENAI; **Areias de Fundação Aglomeradas com Argila**. Publicação Técnica, Departamento Regional de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1987.
58. SIEGEL, M.; **Fundição**. Associação Brasileira de Metais – ABM, 1979.

59. SILVA, T.V. & LANGE, L.C. & TELLO, C.C.O. & TEIXEIRA, L.A.V.; **Estudo Comparativo de Normas de Lixiviação Aplicadas a Resíduos Perigosos Solidificados/Estabilizados em Cimento**. XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitária y Ambiental, Anais, México, 2002.
60. U.S. EPA; **Solidification/Stabilization of Inorganics and Organics**. Engineering Bulletin, USA, 1991.
61. U.S. EPA; **Universal Treatment Standards for Organic Toxicity Characteristics Wastes and Newly Listed Wastes**. Land Disposal Restrictions Phase II, 40CFR148, p. 260-261, 264-266, 268, 271, USA, 1994.
62. U.S. EPA; **Handbook on In-situ Treatment of Hazardous Waste Contaminated Soil**. U.S.EPA/540/2-90/002, USA, Ohio, 1990.
63. WARREN, D.S. & CLARK, A.I. & PERRY, R.; **A Review of Clay-Aromatic Interactions with a View to Their Use in Hazardous Waste Disposal**. Science Total Environment, V. 54, p. 157, 1986.
64. WILK. C.M.; **Stabilization of Heavy Metal with Portland Cement: Research Synopsis**. Portland Cement Association, IS007, Skokie, IL, 1997.
65. _____; **Solidification/Stabilization Treatment: Principles and Practice**. Portland Cement Association, Skokie, IL, 1999.
66. WOLFE, T.A. & DEMIREL, T. & BAUMANN, E.R.; **Absorption of Organic Pollutants on Montmorillonite Treated with Amines**. Water Pollution Control Federation Journal, V.58, 1986.

ANEXO A

ANEXO B

Resistência à compressão CA1 (28dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	5360	27,3
2	5460	27,8
3	5400	27,5
4	5460	27,8
Média		27,6
Desvio Padrão		0,24

Resistência à compressão CA1 (91 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	7150	36,4
2	6910	35,2
3	7010	35,7
4	7050	35,9
Média		35,8
Desvio Padrão		0,49

Resistência à compressão CA1 (365 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	7720	39,3
2	7950	40,5
3	7620	38,8
4	7660	39,0
Média		39,4
Desvio Padrão		0,76

Resistência à compressão CA3 (28dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	3990	20,3
2	4200	21,4
3	4050	20,6
4	4030	20,5
Média		20,7
Desvio Padrão		0,48

Resistência à compressão CA3 (91 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	5320	27,1
2	5160	26,3
3	5070	25,8
4	5260	26,8
Média		26,5
Desvio Padrão		0,57

Resistência à compressão CA3 (365 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	5380	27,4
2	5600	28,5
3	5710	29,1
4	5770	29,4
Média		28,6
Desvio Padrão		0,88

Resistência à compressão CA5 (28 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	2320	11,8
2	2140	10,9
3	2260	11,5
4	2390	12,2
Média		11,6
Desvio Padrão		0,54

Resistência à compressão CA5 (91 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	2890	14,7
2	2770	14,1
3	2650	13,5
4	2690	13,7
Média		14,0
Desvio Padrão		0,53

Resistência à compressão CA5 (365 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	2930	14,9
2	3060	15,6
3	2980	15,2
4	2890	14,7
Média		15,1
Desvio Padrão		0,39

Resistência à compressão CR1 (28 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	4610	23,5
2	4460	22,7
3	4560	23,2
4	4440	22,6
Média		23,0
Desvio Padrão		0,42

Resistência à compressão CR1 (91 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	5810	29,6
2	5560	28,3
3	5730	29,2
4	5590	28,5
Média		28,9
Desvio Padrão		0,60

Resistência à compressão CR1 (365 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	6360	32,4
2	6130	31,2
3	6010	30,6
4	6240	31,8
Média		31,5
Desvio Padrão		0,77

Resistência à compressão CR3 (28 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	3000	15,3
2	3300	16,8
3	3420	17,4
4	3240	16,5
Média		16,5
Desvio Padrão		0,88

Resistência à compressão CR3 (91 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	4400	22,4
2	3950	20,1
3	4180	21,3
4	3890	19,8
Média		20,9
Desvio Padrão		1,19

Resistência à compressão CR3 (365 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	4930	25,1
2	4020	20,5
3	4510	23,0
4	3910	19,9
Média		22,1
Desvio Padrão		2,39

Resistência à compressão CR5 (28 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	1800	9,2
2	1610	8,2
3	1630	8,3
4	1870	9,5
Média		8,8
Desvio Padrão		0,65

Resistência à compressão CR5 (91 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	2260	11,5
2	1830	9,3
3	2120	10,8
4	2200	11,2
Média		10,7
Desvio Padrão		0,97

Resistência à compressão CR5 (365 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	2080	10,6
2	2380	12,1
3	2260	11,5
4	2400	12,2
Média		11,6
Desvio Padrão		0,73

Resistência à compressão CRB1 (28 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	3690	18,8
2	3590	18,3
3	3440	17,5
4	3650	18,6
Média		18,3
Desvio Padrão		0,57

Resistência à compressão CRB1 (91 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	3870	19,7
2	4160	21,2
3	4030	20,5
4	4120	21,0
Média		20,6
Desvio Padrão		0,67

Resistência à compressão CRB1 (365 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	4260	21,7
2	4080	20,8
3	4140	21,1
4	4320	22,0
Média		21,4
Desvio Padrão		0,55

Resistência à compressão CRB3 (28 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	2280	11,6
2	2340	11,9
3	2200	11,2
4	2220	11,3
Média		11,5
Desvio Padrão		0,32

Resistência à compressão CRB3 (91 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	2380	12,1
2	2710	13,8
3	2490	12,7
4	2630	13,4
Média		13,0
Desvio Padrão		0,75

Resistência à compressão CRB3 (365 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	2510	12,8
2	2670	13,6
3	2730	13,9
4	2460	12,5
Média		13,2
Desvio Padrão		0,66

Resistência à compressão CRS1 (28 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	8010	40,8
2	8150	41,5
3	7970	40,6
4	8300	42,3
Média		41,3
Desvio Padrão		0,77

Resistência à compressão CRS1 (91 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	9640	49,1
2	9560	48,7
3	9980	50,8
4	9700	49,4
Média		49,5
Desvio Padrão		0,91

Resistência à compressão CRS1 (365 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	10310	52,5
2	10130	51,6
3	10410	53,0
4	9990	50,9
Média		52,0
Desvio Padrão		0,93

Resistência à compressão CRS3 (28 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	6420	32,7
2	6520	33,2
3	6580	33,5
4	6240	31,8
Média		32,8
Desvio Padrão		0,74

Resistência à compressão CRS3 (91 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	8150	41,5
2	7910	40,3
3	7800	39,7
4	7640	38,9
Média		40,1
Desvio Padrão		1,09

Resistência à compressão CRS3 (365 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	7950	40,5
2	8380	42,7
3	8090	41,2
4	8400	42,8
Média		41,8
Desvio Padrão		1,13

Resistência à compressão CRBS1 (28 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	3990	20,3
2	3950	20,1
3	4120	21,0
4	4050	20,6
Média		20,5
Desvio Padrão		0,39

Resistência à compressão CRBS1 (91 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	4930	25,1
2	4750	24,2
3	4790	24,4
4	4850	24,7
Média		24,6
Desvio Padrão		0,40

Resistência à compressão CRBS1 (365 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	5010	25,5
2	5160	26,3
3	5070	25,8
4	5030	25,6
Média		25,8
Desvio Padrão		0,36

Resistência à compressão CRBS3 (28 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	2650	13,5
2	2770	14,1
3	2910	14,8
4	2830	14,4
Média		14,2
Desvio Padrão		0,55

Resistência à compressão CRBS3 (91 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	3200	16,3
2	2960	15,1
3	3100	15,8
4	3060	15,6
Média		15,7
Desvio Padrão		0,50

Resistência à compressão CRBS3 (365 dias)

C.P.	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)
1	3240	16,5
2	3300	16,8
3	3100	15,8
4	3320	16,9
Média		16,5
Desvio Padrão		0,51

ANEXO C

Curva de permeabilidade ao ar – matriz CRB1

Curva de permeabilidade ao ar – matriz CRBS1

Curva de permeabilidade ao ar – matriz CR3

Curva de permeabilidade ao ar – matriz CRB3

Curva de permeabilidade ao ar – matriz CRS3

Curva de permeabilidade ao ar – matriz CRBS3