

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

51, 52, 54, 55

**ENCAPSULAMENTO DE AREIA DE FUNDIÇÃO
DE DESCARTE EM MATRIZ DE CIMENTO**



DEDALUS - Acervo - EESC



31100016588

ROBERTA CELANTE DE OLIVEIRA

**Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
Título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jurandyr Povinelli

**São Carlos
1996**

Hidráulica e Saneamento

Class.	TESE - EESC
Curr.	4072
Tombo	T041197

st 0746911

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

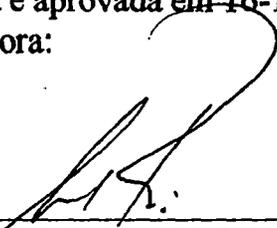
Oliveira, Roberta Celante de
048e Encapsulamento de areia de fundição de descarte
em matriz de cimento / Roberta Celante de
Oliveira. -- São Carlos, 1996.

Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1996.
Orientador: Prof. Dr. Jurandyr Povinelli.

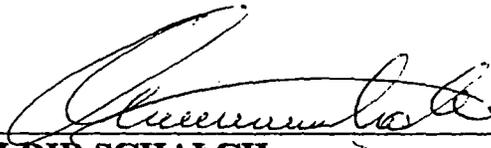
1. Resíduo industrial. 2. Metais pesados. 3.
Encapsulamento. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

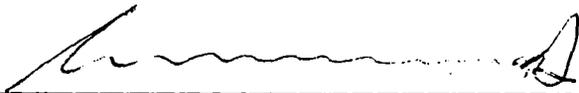
Dissertação defendida e aprovada em 16-12-1996
pela Comissão Julgadora:



Prof. Titular **JURANDYR POVINELLI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



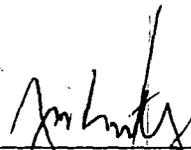
Prof. Doutor **VALDIR SCHALCH**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **LAÉRCIO FERREIRA E SILVA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Coordenador da Área de Hidráulica e
Saneamento
Prof. Associado. **EDUARDO CLETO PIRES**



Presidente da Comissão de Pós-Graduação
JOSÉ CARLOS A. CINTRA

Aos meus pais e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jurandyr Povinelli pela excelente orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

Ao CNPq, pela bolsa de estudo concedida durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, especialmente ao ecólogo José Miguel Deriggi (in memoriam) e ao químico Júlio César Trofino, pelo apoio técnico durante a realização das análises físico-químicas.

Aos técnicos do Laboratório de Construção Civil do Departamento de Arquitetura e Construção da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

Aos técnicos do Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

Aos técnicos do Laboratório de Química Analítica da Universidade Federal de São Carlos.

Aos funcionários da Biblioteca Central da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

Ao Prof. Dr. Laércio Ferreira e Silva pelo auxílio e sugestões durante a pesquisa.

À Engenheira Ana Luiza F. C. Maragno, pela ajuda durante a realização dos ensaios, mas principalmente, pela amizade construída durante este convívio.

Ao Engenheiro Javier Mazariegos Pablos, pela realização dos ensaios de aplicação do resíduo na construção civil e auxílio na conclusão deste trabalho.

Registro meu profundo agradecimento aos amigos Luis e Sérgio, e destaco, finalmente, o apoio, incentivo e colaboração da amiga Romy, com quem divido os méritos dessa empreitada.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1- INTRODUÇÃO.....	1
2- OBJETIVOS.....	4
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1- METAIS PESADOS.....	5
3.1.1- Definição.....	5
3.1.2- Toxicidade dos metais pesados.....	5
3.1.2.1- Alumínio.....	7
3.1.2.2- Cádmio.....	8
3.1.2.3- Chumbo.....	8
3.1.2.4- Cobre.....	9
3.1.2.5- Cromo.....	10
3.1.2.6- Ferro.....	10
3.1.2.7- Manganês.....	11
3.1.2.8- Níquel.....	11
3.1.2.9- Zinco.....	12
3.2- RESÍDUOS SÓLIDOS.....	12
3.2.1- Classificação.....	12
3.2.2- Resíduos sólidos do processo de fundição.....	13
3.3- PROCESSO DE ENCAPSULAMENTO.....	15
3.3.1- Definição.....	15
3.3.2- Tecnologias desenvolvidas e aplicadas.....	16
3.3.2.1- Técnicas baseadas em materiais pozolânicos (não incluindo cimento).....	16
3.3.2.2- Técnicas baseadas em termoplásticos.....	17
3.3.2.3- Técnicas de polímeros orgânicos.....	17
3.3.2.4- Técnicas de encapsulamento.....	18
3.3.2.5- Técnicas de auto-solidificação.....	18
3.3.2.6- Vitrificação ou incorporação em materiais cerâmicos de resíduos perigosos.....	19

✕	3.4- ENCAPSULAMENTO COM CIMENTO.....	19
	3.4.1- Vantagens e desvantagens.....	20
✕	3.5- ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND.....	21
	3.5.1- Definição.....	21
	3.5.2- Materiais.....	21
	3.5.2.1- Cimento Portland.....	21
	3.5.2.2- Agregados.....	23
	3.5.3- Propriedades.....	24
	3.6- APRESENTAÇÃO DE TRABALHOS SOBRE ENCAPSULAMENTO DE RESÍDUOS.....	25
	3.6.1- Solidificação de lamas galvânicas com cimento.....	26
✕	3.6.2- Estudo da lixiviabilidade de resíduos sólidos contendo metais pesados.....	33
	3.6.3- Interferências no processo de encapsulamento provocadas pela presença de determinados compostos.....	35
	3.6.4- Influência dos metais na cura do cimento.....	36
	3.6.5- Efeito de componentes orgânicos em processos de encapsulamento com cimento.....	37
	3.6.6- Resíduos tratando resíduos.....	39
	3.6.7- Encapsulamento de metais pesados em matrizes de cimento melhoradas....	40
	3.6.8- Estudo da aplicação da areia de fundição de descarte em peças de cimento.....	42
	3.6.9- Agregados de concreto reciclado e de resíduos de rejeitos urbanos.....	47
	4- ENCAPSULAMENTO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM MATRIZ DE CIMENTO - DESCRIÇÃO DA NATUREZA DO RESÍDUO.....	50
	4.1- FONTE GERADORA.....	50
	4.1.1- O processo industrial.....	51
✕	5- ENCAPSULAMENTO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM MATRIZ DE CIMENTO - DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	53
✕	5.1- ENSAIOS PRELIMINARES.....	53
✕	5.1.1- Caracterização do resíduo pesquisado.....	54
	5.1.1.1- Análise quantitativa do resíduo bruto.....	54
✕	5.1.1.2- Caracterização do resíduo como agregado para a utilização na composição de argamassas de cimento Portland.....	54
✕	5.1.1.3- Determinação inicial das proporções cimento:resíduo das misturas.....	59
✕	5.1.1.4- Resistência à compressão dos ensaios preliminares.....	61
✕	5.1.1.5- Determinação das consistências das argamassas de cimento-resíduo.....	61
	5.2- RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS PRELIMINARES.....	61
✕	5.2.1- Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo bruto.....	61
✕	5.2.2- Resultados dos ensaios de granulometria do resíduo.....	64
✕	5.2.3- Resultados da análise de teor de materiais pulverulentos.....	64
✕	5.2.4- Resultados do ensaio de sólidos totais.....	64
✕	5.2.5- Massa específica e massa unitária.....	65

✓ 5.2.6- Teor de umidade.....	66
5.2.7- Reconhecimento das condições de trabalhabilidade e resistência - definição dos traços cimento:resíduo.....	66
5.2.8- Verificação das condições de trabalhabilidade e resistência - influência da consistência da argamassa.....	67
5.3- CONCLUSÕES DOS ENSAIOS PRELIMINARES.....	68
5.3.1- Proporções entre os materiais das misturas.....	68
5.3.2- Preparação das misturas.....	68
5.3.3- Idade das matrizes ensaiadas.....	69
5.3.4- Consistência das misturas.....	69
5.3.5- Ensaios realizados para determinação da eficiência do processo.....	69
5.3.6- Corpos-de-prova moldados.....	69
→ 5.4- METODOLOGIA DA FASE EXPERIMENTAL.....	69
5.4.1- Secagem e peneiramento da areia de fundição.....	70
5.4.2- Preparo dos moldes para moldagem dos corpos-de-prova.....	70
5.4.3- Preparo da misturas.....	71
5.4.4- Determinação da consistência das misturas.....	72
5.4.5- Moldagem dos corpos-de-prova.....	72
5.4.6- Cura dos corpos-de-prova.....	73
5.4.7- Capeamento dos corpos-de-prova.....	73
5.4.8- Ensaios de resistência mecânica das misturas solidificadas.....	73
5.4.9- Ensaio de lixiviação das misturas solidificadas.....	74
5.4.10- Ensaio de solubilização das misturas solidificadas.....	75
5.4.11- Difração de raios-X.....	76
6- RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS.....	85
6.1- ANÁLISE DA POSSÍVEL INFLUÊNCIA DO TEMPO DE AGITAÇÃO... ..	85
6.2- ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	86
6.3- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO. ..	95
6.4- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO DO CIMENTO... ..	101
6.5- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO DA ÁGUA DESTILADA.....	101
6.6- RESULTADOS DA SOLUBILIZAÇÃO MÚLTIPLA DAS MATRIZES DE CIMENTO E AREIA DE FUNDIÇÃO DE DESCARTE.....	102
6.7- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO - TRAÇO 1:2.....	103
6.8- RESULTADO DA DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	104
7- DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	108
7.1- MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA.....	108

7.2- RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS MATRIZES SOLIDIFICADAS...	109
7.3- FIXAÇÃO DOS POLUENTES NAS MATRIZES SOLIDIFICADAS.....	110
7.4- LIXIVIAÇÃO DOS METAIS NAS MATRIZES SOLIDIFICADAS.....	113
7.5- SOLUBILIZAÇÃO DOS METAIS NAS MATRIZES SOLIDIFICADAS...	115
7.6- SOLUBILIZAÇÃO DO CIMENTO E DA ÁGUA DESTILADA.....	117
7.7- SOLUBILIZAÇÃO MÚLTIPLA.....	118
7.8- DIFRATOMETRIA DE RAIO-X.....	119
7.9- ASPECTOS ECONÔMICOS.....	119
8- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	121
ANEXO A.....	125
ANEXO B.....	135
ANEXO C.....	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1- Curva de compactação da composição cimento-resíduo 1:3.....	44
FIGURA 3.2- Curva de compactação da composição cimento-resíduo 1:5.....	44
FIGURA 3.3- Curva de compactação da composição cimento-resíduo 1:7.....	45
FIGURA 3.4- Resistência à compressão de tijolos maciços empregando areia de fundição de descarte.....	46
FIGURA 3.5- Absorção de água de tijolos maciços empregando areia de fundição de descarte.....	47
FIGURA 4.1- Fluxograma simplificado do processo de fundição.....	52
FIGURA 5.1- Caracterização da areia de fundição de descarte.....	62
FIGURA 5.2- Curva granulométrica da areia de fundição de descarte com os limites para zona 1 (amostra 1).....	63
FIGURA 5.3- Curva granulométrica da areia de fundição de descarte com os limites para zona 1 (amostra 2).....	63
FIGURA 5.4- Resistência à compressão das matrizes de cimento-resíduo (7 dias).....	66
FIGURA 5.5- Secagem e peneiramento do resíduo.....	77
FIGURA 5.6- Moldes para ensaio de resistência e para ensaios de lixiviação-solubilização.....	78
FIGURA 5.7- Argamassadeira utilizada para o preparo das misturas.....	78
FIGURA 5.8- Aspecto da determinação da consistência da mistura.....	79
FIGURA 5.9- Aspecto da moldagem dos corpos-de-prova.....	80
FIGURA 5.10- Cura dos corpos-de-prova.....	80
FIGURA 5.11- Corpos-de-prova capeados para ensaio de resistência mecânica.....	81
FIGURA 5.12- Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão.....	81
FIGURA 5.13- Corpos-de-prova submetidos aos ensaio de lixiviação.....	82

FIGURA 5.14- Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de solubilização.....	82
FIGURA 5.15- Esquema para filtração das amostras.....	83
FIGURA 5.16- Espectrofotômetro de absorção atômica utilizado no trabalho (Intralab AA-1275).....	83
FIGURA 5.17- Pastilhas moldadas para ensaio de difração de raio-X.....	84
FIGURA 5.18- Difratorômetro de raio-X utilizado no trabalho (Gerador Rigaku - RU 200B).....	84
FIGURA 6.1- Resistência à compressão em função da idade (traço 1:3).....	87
FIGURA 6.2- Resistência à compressão em função da idade (traço 1:5).....	89
FIGURA 6.3- Resistência à compressão em função da idade (traço 1:8).....	91
FIGURA 6.4- Resistência à compressão em função da idade (traço 1:10).....	93
FIGURA 6.5- Resistência média das matrizes ensaiadas.....	94
FIGURA 6.6a- Difratorograma da matriz solidificada - traço 1:3 (28 dias).....	104
FIGURA 6.6b- Difratorograma da matriz solidificada - traço 1:3 (28 dias).....	105
FIGURA 6.7a- Difratorograma da matriz solidificada - traço 1:5 (28 dias).....	106
FIGURA 6.7b- Difratorograma da matriz solidificada - traço 1:5 (28 dias).....	107
FIGURA A.1- Blocos pré-moldados de concreto para pavimentação.....	130

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1- Classificação dos elementos químicos em função da toxicidade e disponibilidade.....	6
TABELA 3.2- Composição do cimento.....	22
TABELA 3.3- Ensaio de compactação da mistura cimento-resíduo (traço 1:3).....	43
TABELA 3.4- Ensaio de compactação da mistura cimento-resíduo (traço 1:5).....	43
TABELA 3.5- Ensaio de compactação da mistura cimento-resíduo (traço 1:7).....	44
TABELA 3.6- Resistência à compressão e absorção de água de tijolos maciços empregando areia de fundição de descarte.....	46
TABELA 4.1- Análise química da areia de moldagem.....	50
TABELA 4.2- Composição básica da areia de fundição empregada na TECUMSEH.....	51
TABELA 5.1- Classificação das areias de acordo com o módulo de finura.....	56
TABELA 5.2- Classificação das areias de acordo com as zonas de retenção acumuladas.....	57
TABELA 5.3- Substâncias deletérias nos agregados.....	57
TABELA 5.4- Lixiviação e solubilização da areia de fundição de descarte (resíduo-bruto).....	61
TABELA 5.5- Composição granulométrica do resíduo (amostra.1).....	62
TABELA 5.6- Composição granulométrica do resíduo (amostra 2).....	63
TABELA 5.7- Teor de materiais pulverulentos do resíduo.....	64
TABELA 5.8- Massa específica do resíduo.....	65
TABELA 5.9- Massa unitária do resíduo no estado solto.....	65
TABELA 5.10- Teor de umidade do resíduo seco ao ar.....	66
TABELA 5.11- Resistência à compressão das matrizes de cimento-resíduo (7dias).....	66

TABELA 5.12- Variação da trabalhabilidade e resistência em função da consistência das misturas (traço 1:3).....	67
TABELA 5.13- Variação da trabalhabilidade e resistência em função da consistência das misturas (traço 1:10).....	67
TABELA 6.1- Ensaio de lixiviação com tempo de agitação variado (traço 1:3).....	85
TABELA 6.2- Ensaio de lixiviação com tempo de agitação variado (traço 1:5).....	85
TABELA 6.3- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:3 (7 dias).....	86
TABELA 6.4- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:3 (28 dias).....	86
TABELA 6.5- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:3 (90 dias).....	87
TABELA 6.6- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:5 (7 dias).....	88
TABELA 6.7- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:5 (28 dias).....	88
TABELA 6.8- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:5 (90 dias).....	89
TABELA 6.9- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:8 (7 dias).....	90
TABELA 6.10- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:8 (28 dias).....	90
TABELA 6.11- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:8 (90 dias).....	91
TABELA 6.12- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:10 (7 dias).....	92
TABELA 6.13- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:10 (28 dias).....	92
TABELA 6.14- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:10 (90 dias).....	93
TABELA 6.15- Resistência média das matrizes de areia de fundição de descarte...	94
TABELA 6.16- Lixiviação e solubilização - traço 1:3 (7 dias).....	95
TABELA 6.17- Lixiviação e solubilização - traço 1:3 (28 dias).....	95
TABELA 6.18- Lixiviação e solubilização - traço 1:3 (90 dias).....	96
TABELA 6.19- Lixiviação e solubilização - traço 1:5 (7 dias).....	96
TABELA 6.20- Lixiviação e solubilização - traço 1:5 (28 dias).....	97

TABELA 6.21- Lixiviação e solubilização - traço 1:5 (90 dias).....	97
TABELA 6.22- Lixiviação e solubilização - traço 1:8 (7 dias).....	98
TABELA 6.23- Lixiviação e solubilização - traço 1:8 (28 dias).....	98
TABELA 6.24- Lixiviação e solubilização - traço 1:8 (90 dias).....	99
TABELA 6.25- Lixiviação e solubilização - traço 1:10 (7 dias).....	99
TABELA 6.26- Lixiviação e solubilização - traço 1:10 (28 dias).....	100
TABELA 6.27- Lixiviação e solubilização - traço 1:10 (90 dias).....	100
TABELA 6.28- Solubilização do cimento empregado na pesquisa.....	101
TABELA 6.29- Solubilização da água destilada.....	101
TABELA 6.30- Solubilização múltipla - traço 1:3.....	102
TABELA 6.31- Solubilização múltipla - traço 1:5.....	102
TABELA 6.32- Solubilização múltipla - traço 1:8.....	103
TABELA 6.33- Solubilização - traço 1:2 (7 dias).....	103
TABELA 7.1- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:3 - 7 dias).....	110
TABELA 7.2- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:3 - 28 dias).....	111
TABELA 7.3- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:3 - 90 dias).....	111
TABELA 7.4- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:5 - 7 dias).....	111
TABELA 7.5- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:5 - 28 dias).....	111
TABELA 7.6- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:5 - 90 dias).....	112
TABELA 7.7- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:8 - 7 dias).....	112
TABELA 7.8- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:8 - 28 dias).....	112
TABELA 7.9- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:8 - 90 dias).....	112
TABELA 7.10- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:10 - 7 dias).....	113
TABELA 7.11- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:10 - 28 dias).....	113

TABELA 7.12- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:10 - 90 dias).....	113
TABELA 7.13- Estimativa do preço de mercado de tijolos maciços com areia de fundição de descarte.....	120
TABELA 7.14- Valor de mercado de tijolos cerâmicos.....	120
TABELA A.1- Resultado do ensaio de resistência mecânica dos bloquetes (28 dias).....	131
TABELA A.2- Resultado do ensaio de resistência mecânica dos bloquetes (90 dias).....	131
TABELA A.3- Preparação da amostra - bloquete com areia de fundição.....	132
TABELA A.4- Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles - bloquete com areia de fundição.....	132
TABELA A.5- Preparação da amostra - bloquete sem areia de fundição (padrão).	133
TABELA A.6- Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles - bloquete sem areia de fundição (padrão).....	133
TABELA A.7- Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização dos bloquetes (90 dias).....	134
TABELA B.1- Resistência mecânica (média) das matrizes de areia de fundição....	136
TABELA B.2- Resistência mecânica (média) das matrizes de areia composta.....	136
TABELA C.1- Ensaio de solubilização de tijolos empregando areia de fundição de descarte.....	139

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c- Relação água-cimento em massa
Al- Alumínio
Ba- Bário
Cd- Cádmio
CETESB- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
Co- Cobalto
c.p.- Corpo-de-prova
CP I- Cimento Portland Comum
CP II-E- Cimento Portland Composto com Escória
CP III- Cimento Portland de Alto Forno
CP IV- Cimento Portland Pozolânico
CP V-ARI- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
Cr- Cromo
Cu- Cobre
Fe- Ferro
Ho- Umidade ótima de compactação
M.F.- Módulo de finura
Mn- Manganês
MTCLP - Multiple Toxicity Characteristic Leaching Procedure
Ni- Níquel
Pb- Chumbo
Se- Selênio
ST- Sólidos totais
STF- Sólidos totais fixos
STV- Sólidos totais voláteis
U.F.- Uréia-formaldeído
WHO- World Health Organization
Yh- Densidade úmida
Ys- Densidade seca
Ysm- Densidade seca máxima
Zn- Zinco

RESUMO

OLIVEIRA, R.C. *Encapsulamento de areia de fundição de descarte em matriz de cimento*. São Carlos, 1996. 142p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho propõe um estudo para eliminação ou minimização dos efeitos ambientais causados pelos resíduos gerados nos processos de fundição. A areia de fundição de descarte é geralmente disposta inadequadamente, podendo liberar metais pesados nela presentes. Adotando como proposta de tratamento o processo de encapsulamento (solidificação) de resíduos com cimento, a pesquisa determinou composições para argamassas de cimento Portland empregando a areia de fundição como agregado. As matrizes confeccionadas nas proporções cimento-resíduo 1:3, 1:5, 1:8 e 1:10, foram submetidas aos ensaios de lixiviação, solubilização, difratometria de raios-X e resistência mecânica à compressão, nas idades de 7, 28 e 90 dias. Os resultados dos ensaios realizados permitiram concluir que o encapsulamento com cimento é técnica viável para destoxificação desses resíduos e as resistências das matrizes formadas, demonstraram a potencialidade de emprego da areia de fundição de descarte em peças de cimento para construção civil.

Palavras chave: resíduo industrial; metais pesados; encapsulamento.

ABSTRACT

OLIVEIRA, R.C. *Foundry sand encapsulation in cement matrix*. São Carlos, 1996. 142p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This paper presents a study of elimination and minimization of the environmental effects caused by waste generated from casting processes. Discardable foundry sand is usually improperly disposed of and may provoke the release of heavy metals contained in it. Adopting the cement waste encapsulation (solidification) as a treatment process, the research has determined combinations for Portland cement mortars, aggregating foundry sand. Matrices with cement/waste ratios of 1:3, 1:5, 1:8 and 1:10 have been subjected to experiments of leaching, solubilization, X-ray diffraction and compressive strength, at the ages of 7, 28 and 90 days. The results have led to the conclusion that cement encapsulation is a feasible and successful technique for detoxication of such wastes, and the resistances of the matrices formed have shown the potenciality of using discardable foundry sand in cement pieces in the field of Civil engineering.

Keywords: industrial waste; heavy metals; encapsulation.

1- INTRODUÇÃO

O acentuado crescimento das comunidades e sobretudo da atividade industrial, tem acarretado um aumento considerável na produção de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, particularmente no que se refere aos de origem industrial.

O trato inadequado desses resíduos contribui de forma marcante para o agravamento dos problemas ambientais, notadamente nos grandes centros urbanos.

Como evidência deste fato, destaca-se o manuseio e destino final dos resíduos sólidos industriais, que constituem tarefas potencialmente poluidoras do meio ambiente: água, ar e solo.

A gravidade da situação, que abrange questões de saúde pública, social, urbanística e ambiental, tem obrigado a proceder-se a reformulações dos processos industriais, evitando-se assim a dispersão dos poluentes no ambiente.

A questão meio ambiente vem assumindo importância mais marcante nas atividades industriais e comerciais a partir da última década. Para as empresas que pretendem continuar competitivas, a palavra ambiente passou a significar muito mais, do que simplesmente gastar em equipamentos antipoluição, para evitar problemas com grupos ecologistas ou órgãos governamentais.

Nos últimos anos, as questões ambientais transcenderam as fronteiras nacionais, impondo-se como ponto essencial no comércio internacional e levando as empresas a um dilema: adaptar-se às exigências nessa área ou correr o risco de perder espaço. Os consumidores questionam cada vez mais a origem e a forma como são produzidos os bens que adquirem, valorizando a qualidade de vida. A ISO 14.000 bem mostra estes aspectos.

“Um dos maiores símbolos de status no mundo, o automóvel BMW é produzido hoje na Alemanha com 60% de sucata. Efeito da pressão ambiental.”¹

Esse é apenas um pequeno exemplo da reformulação dos processos industriais que se alastra por todo o Planeta e já atinge diversas empresas brasileiras.

Incorporar tecnologia para viabilizar processos de produção mais limpos é o diferencial que vai garantir a própria sobrevivência da empresa. No Brasil, a questão ambiental está deixando de ser tratada como um sonho romântico para incorporar-se ao dia-a-dia das empresas.²

Dentro desse espírito, este trabalho propõe um estudo de caráter inédito, para eliminação ou minimização dos efeitos ambientais causados pela areia gerada nos processos de fundição. Tais resíduos, em sua grande maioria são descartados ou dispostos inadequadamente, expostos ao contato de águas pluviais ácidas ou dos chorumes de aterros sanitários, podendo liberar metais pesados neles presentes, cujos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública justificam a necessidade de adequado manuseio e destino.

Como proposta de tratamento, optou-se pela aplicação da técnica de encapsulamento (solidificação) de resíduos sólidos. Empregada em muitos casos como uma alternativa de uso fácil e de custo razoável, esta técnica visa transformar os resíduos em materiais com melhores características de manuseio, transporte, acondicionamento e disposição final, até mesmo aplicação na construção civil, e principalmente, fixar os contaminantes perigosos neles presentes.

Dentre os métodos de encapsulamento possíveis, a técnica baseada em matrizes de cimento é, sem dúvida, o método mais econômico devido ao baixo custo da própria matéria-prima, bem como do investimento inicial que, basicamente, requer equipamentos comuns de mistura. Como o processo ocorre à temperatura ambiente, também, não há necessidade de energia auxiliar. Estas vantagens aliadas à tecnologia de manuseio e aplicação, assim como às características do cimento que são bem conhecidas, tornam este processo um método econômico e tecnicamente viável, compatível com a realidade do País.

¹ REVISTA DA CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI) - *Indústria e Produtividade*, fevereiro 1995, pág. 19.

² SALA DO EMPRESÁRIO, Revista de Estratégia Empresarial - *Revolução Ambiental*, dezembro 1994.

Neste trabalho, foram desenvolvidos estudos sobre encapsulamento utilizando matrizes de cimento, empregando a areia de fundição como agregado para composição de argamassas de cimento Portland.

Além de tornar o resíduo, objeto da pesquisa, menos agressivo ao meio ambiente, este trabalho mostrou a possibilidade de aplicação do material encapsulado em peças de concreto, que poderão ser empregadas na construção civil (anexo A).

2- OBJETIVOS

Este trabalho procura, em síntese, atender aos seguintes objetivos:

- propiciar opção adequada para destino da areia gerada nos processos de fundição;
- avaliar a capacidade de retenção dos íons tóxicos presentes no resíduo pela matriz solidificada;
- determinar a evolução da resistência à compressão da matriz formada;
- verificar a adequação do cimento à técnica de encapsulamento de metais pesados em matrizes cimentícias;
- propor formas de utilização da matriz solidificada em peças de cimento.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- METAIS PESADOS

3.1.1- Definição

A definição de metais pesados, ao lado do próprio conceito de metal, é um tema que mereceria uma longa discussão, resultando em vários critérios de classificação, variando de autor para autor.

FORSTNER & WITTMANN apud DAMASCENO (1996), definem os metais como elementos que apresentam boa condução de eletricidade e cuja resistência elétrica é diretamente proporcional à temperatura absoluta.

Embora a condutividade elétrica seja a única propriedade que define um elemento como metal, vários metais apresentam também outras características, tais como: boa condução de calor, alta densidade, maleabilidade e ductilidade.

Uma das definições mais comuns, coloca os metais pesados como aqueles elementos químicos com densidade igual ou superior a 5 g/cm^3 . Seriam, assim, classificados nesta categoria os metais da série de transição e os grupos IA, IIIB, IVB, VB e VIB (MATTHEWS apud DAMASCENO, 1996).

Segundo LESTER apud DAMASCENO (1996), o termo metais pesados é normalmente adotado para referir-se aos metais que oferecem risco à saúde humana e ao ambiente, isto é, estão associados com poluição e toxicidade, podendo receber por isso a denominação de metais tóxicos, incluindo também alguns elementos que são biologicamente essenciais como Co, Cu, Mn, Se e Zn.

3.1.2- Toxicidade dos metais pesados

Recentemente, mais atenção tem sido dada aos metais pesados, como: sua reatividade química, efeitos biológicos, destino no ambiente e seu controle. Este

interesse é resultado do conhecimento dos efeitos à saúde e impacto ambiental causados pelos metais, associados com os lançamentos de resíduos industriais e domésticos.

O conteúdo envolvido neste item, é um breve resumo de informações obtidas em trabalhos distintos, que tratam da questão: toxicidade dos metais pesados. Um estudo mais detalhado do assunto, foge dos objetivos estipulados neste projeto, que se limita à identificação desses elementos químicos e não ao reconhecimento da potencialidade de risco que estes oferecem ao homem.

Do ponto de vista da poluição ambiental, os elementos químicos, listados na Tabela 1, podem ser classificados de acordo com três critérios, propostos por WOOD apud DAMASCENO (1996): 1) não crítico; 2) tóxico mas muito pouco solúvel ou muito raro; 3) muito tóxico e relativamente acessível.

TABELA 3.1- Classificação dos elementos químicos em função da toxicidade e disponibilidade

não crítico			tóxico mas muito pouco solúvel ou muito raro		muito tóxico e relativamente acessível		
Na	C	F	Ti	Ga	Be	As	Au
K	P	Li	Hf	La	Co	Se	Hg
Mg	Fe	Rb	Zr	Os	Ni	Te	Tl
Ca	S	Sr	W	Rh	Cu	Pd	Pb
H	Cl	Al	Nb	Ir	Zn	Ag	Sb
O	Br	Si	Ta	Ru	Sn	Cd	Bi
N			Re	Ba		Pt	

Fonte: DAMASCENO (1996).

Os metais, especialmente seus íons, desempenham duas funções distintas na fisiologia dos organismos: enquanto alguns são indispensáveis para vida normal, a maioria deles são tóxicos em elevadas concentrações, afetando a atividade e bem-estar dos organismos (HALL, 1989).

Recentes pesquisas no campo da toxicologia, têm focalizado o estudo dos efeitos adversos ao sistema imunológico causados pelo contato com substâncias químicas e drogas, seja por exposição no local de trabalho ou pela poluição ambiental.

Os estudos realizados por TRACANA et al. (1995), por exemplo, mostraram que a maioria dos íons metálicos pesados são tóxicos ao sistema imunológico, em dosagens bem menores que aquelas que resultariam em intoxicação generalizada, causando alterações nos níveis regulares das células, com graves consequências ao organismo.

A seguir, são apresentadas algumas considerações sobre os efeitos ambientais e toxicológicos de alguns metais de possível presença nas areias de fundição, material empregado na presente pesquisa.

3.1.2.1- Alumínio

Apesar da existência de dados que demonstram algumas preocupações quanto às ações do alumínio (Al), poucos estudos têm sido realizados sobre a toxicidade desse elemento.

Segundo MILLER apud CORDEIRO (1993), concentrações elevadas de Al podem: reduzir a efetividade da desinfecção da água, aumentar a turbidez da água tratada e provocar a deposição de alumínio nas paredes dos tubos.

Algumas experiências realizadas com trutas, indicaram que o Al adicionado na água em dosagens variadas, provocou bruscas mudanças das condições físicas dos peixes, como desânimo generalizado, coloração escurecida, baixa percepção e em alguns casos, a morte dessa espécie (FREEMAN & EVERHART apud CORDEIRO, 1993).

CORNWELL et al. apud CORDEIRO (1993), estudando o efeito do Al para pequenos peixes, concluíram que formas inorgânicas de Al parecem ter uma toxicidade mais significativa.

Em relação ao homem, “estudos têm mostrado que a concentração de Al não é crítica a nível de células renais, quando essas permitem uma rápida eliminação desse elemento, através das excreções. Se por ventura, essas células não funcionarem bem, existe a possibilidade do Al se concentrar em outras células, como as cerebrais e cardíacas, por exemplo. Esse fato poderá ser altamente nocivo, afetando de maneira ainda pouco conhecida o funcionamento dessas células” (BOURBIGOT apud CORDEIRO, 1993).

Para REDICDIT apud CORDEIRO (1993), o Al tem uma grande importância em doenças cardiovasculares, como a coagulação cardiovascular.

3.1.2.2- Cádmio

O cádmio (Cd) é um metal extremamente tóxico mesmo em baixas concentrações, ou melhor, juntamente com o mercúrio (Hg) e o chumbo (Pb) podem ser considerados os metais pesados mais tóxicos conhecidos. Possui alta capacidade de acumulação em plantas, no plancton marinho e nos organismos invertebrados. Não se acumula nos tecidos dos peixes, provocando todavia, a morte dos mesmos por asfixia pela ação oligodinâmica. No ser humano acumula-se notadamente nos rins e fígado. É um irritante gastrointestinal, podendo provocar quando na forma solúvel, intoxicações agudas e crônicas (CLÁUDIO, 1987). Os efeitos de intoxicação aguda por Cd são muito sérios, como a hipertensão, problemas de rins, destruição dos tecidos dos testículos e destruição dos glóbulos vermelhos do sangue (MANAHAN apud DAMASCENO, 1996).

“Um dos casos clássicos de poluição ambiental que acarretou o envenenamento de toda uma comunidade, está relacionado com o Cd. Trata-se do célebre acidente de Toyama, no Japão, ocorrido nos anos de 1946 e 1947. Moradores da cidade, localizada próxima a uma mineração, começaram a apresentar os sintomas de uma doença que se tornou conhecida pelo nome de “Itai-Itai”. O principal sintoma dessa doença é o acesso repentino de dores de extrema intensidade (a palavra “Itai” pode se traduzida livremente como “dor intensa”). Mais tarde, descobriu-se que a doença estava associada ao acúmulo de Cd nos rins e fígado, decorrente da contaminação das águas do rio e das plantações de arroz da região. A presença de Cd naquelas águas variava de 0,005 mg/L a 0,18 mg/L”(CLÁUDIO, 1987, p. 64).

Grande parte da ação fisiológica do Cd é devida a sua similaridade ao Zn, podendo substituí-lo em algumas enzimas, causando alterações e impedindo a atividade catalítica das mesmas (MANAHAN apud DAMASCENO, 1996).

3.1.2.3- Chumbo

Incluído entre os três metais pesados mais tóxicos, o principal risco toxicológico do chumbo (Pb) é devido ao seu efeito bioacumulativo, tanto nos tecidos animais como em plantas (CLÁUDIO, 1987).

O Pb ocorre nas águas naturais em concentrações muito baixas. Valores maiores têm sido registrados onde ocorre contaminação, principalmente, como resultado de atividades industriais (WORLD HEALTH ORGANIZATION apud DAMASCENO, 1996).

Segundo CLÁUDIO (1987), os sintomas clínicos da contaminação por Pb são: perda de apetite, fraqueza, apatia, dores de cabeça e musculares.

A toxicidade aguda causada pelo Pb provoca disfunções nos rins, no sistema reprodutivo, fígado, no cérebro e sistema nervoso central, resultando em doenças ou mortes. Em doses menores pode causar anemia. Em crianças o Pb causa retardamento mental (MANAHAN apud DAMASCENO, 1996).

3.1.2.4- Cobre

O cobre (Cu) em determinadas concentrações é vital para a saúde humana, sendo um elemento usado em processos de formação do sangue e utilização do ferro. A falta de cobre no organismo é caracterizada por anemia hipocrômica e microcítica, resultadas da dificuldade de síntese de hemoglobina no sangue (CLÁUDIO, 1987).

Segundo SANDSTEAD apud DAMASCENO (1996), o Cu é absorvido através do trato intestinal (40 a 70%), entretanto, a absorção varia com o tipo de entrada. Uma vez absorvido, o Cu é transportado pelo sangue e estocado nos músculos, fígado e tecidos do cérebro.

Embora sempre presente em águas naturais, quando em concentrações elevadas, o Cu pode se tornar prejudicial à saúde, além de conferir sabor à água (CLÁUDIO, 1987).

Em casos de toxicidade aguda, o Cu é encontrado no cérebro, fígado, estômago e urina, sendo alguns dos sintomas: úlceras gástricas, necroses no fígado e problemas renais (LESTER apud DAMASCENO, 1996).

“O Cu é um elemento essencial para plantas e animais, estando presente em diversas proteínas identificadas em sistemas biológicos, tais como a tirosinase, lacase, e citocromo oxidase”(MOORE & RAMAMOORTHY apud DAMASCENO, 1996, p.13).

“Os peixes aparentemente são muito sensíveis ao Cu, visto suas guelras não serem providas de uma barreira efetiva contra a sua absorção. O Cu pode provocar a coagulação do muco das brânquias, causando a morte por asfixia. A este fenômeno denomina-se ação oligodinâmica” (CLÁUDIO, 1987, p.60).

3.1.2.5- Cromo

O cromo (Cr) existe em vários estados de valência, embora apenas as formas trivalente e hexavalente apresentem significado ambiental, visto serem as formas mais frequentes de ocorrência (CLÁUDIO, 1987).

Tal metal é absorvido através dos tratos gastrointestinal e respiratório e seu efeito tóxico depende da sua forma química. O Cr trivalente em baixas concentrações é considerado a forma essencial do elemento para o ser humano, mostrando-se necessário para o metabolismo da glicose, lipídeo, para a utilização de aminoácidos em vários sistemas, como também para prevenção de diabete e arteriosclerose (TOWILL et al. apud DAMASCENO, 1996).

A forma hexavalente do Cr é considerada tóxica, sendo reconhecida como carcinogênica, provocando câncer no trato digestivo e nos pulmões, podendo causar também dermatites e úlceras na pele e nas narinas (WHO apud DAMASCENO, 1996).

3.1.2.6- Ferro

O ferro (Fe) originário dos despejos industriais encontra-se geralmente sob a forma coloidal, solúvel, formando complexos com substâncias orgânicas e inorgânicas, ou ainda em suspensão nas partículas de sílica e argila. Causa sabor, odor e cor nas águas, além de favorecer o desenvolvimento das “bactérias de ferro”, que produzem incrustações obstruidoras das tubulações (CLÁUDIO, 1987).

TRACANA et al. (1995), investigaram a toxicidade dos íons metálicos do aço inoxidável, pela observação dos seus efeitos imunopatológicos. Para isso, uma solução contendo produtos da corrosão do aço inoxidável foi injetada em ratos e após intervalo de tempo variado, o baço desses animais foi retirado e analisado.

Os resultados mostraram que os produtos de corrosão se acumularam no baço, causando alterações histológicas e indução de mudanças na população celular,

em particular, esgotamento dos linfócitos. Quando comparado ao Cr e Ni, Fe foi o íon metálico preferencialmente acumulado. Esse estudo concluiu que o Fe pode causar danos ao sistema imunológico.

3.1.2.7- Manganês

O manganês (Mn) é considerado um elemento biologicamente essencial. Os problemas de poluição ambiental causados pelo Mn são relativamente insignificantes em comparação com os problemas associados aos demais metais pesados, sendo os efeitos biológicos mais comuns, encontrados em plantas expostas a doses naturais excessivas de Mn em solos sob algumas condições, por exemplo, inundação (SMITH apud DAMASCENO, 1996).

3.1.2.8- Níquel

Nas águas naturais o níquel (Ni) se apresenta na forma Ni^{2+} , formando complexos estáveis com ligantes orgânicos e inorgânicos (MOORE & RAMAMOORTHY apud DAMASCENO, 1996). As concentrações a que, normalmente, o homem encontra-se exposto são aceitáveis.

O efeito toxicológico do Ni depende da forma química em que ele se encontra. O Ni metálico, é relativamente não tóxico, enquanto a maioria de seus sais possuem toxicidade elevada, sendo o Ni carbônico extremamente tóxico (CLÁUDIO, 1987).

Há poucas evidências de acumulação de Ni nos tecidos orgânicos, sendo excretado pelas fezes, suor e urina. As concentrações tóxicas de Ni podem causar muitos efeitos, como indução de câncer nasal, pulmonar e na laringe, indução ao aparecimento de tumores malignos nos rins, efeitos mutagênicos pela ligação do Ni aos ácidos nucleicos e outros (MOORE & RAMAMOORTHY apud DAMASCENO, 1996).

“Da mesma forma que diversos outros íons metálicos pesados, o Ni em solução nas águas naturais, pode coagular a secreção da mucosa produzida pelas brânquias dos peixes, provocando a morte dos mesmos por asfixia” (CLÁUDIO, 1987, p.62).

3.1.2.9- Zinco

O zinco (Zn) é um elemento essencial para o organismo humano e animal, exercendo função na síntese e metabolismo de proteínas e ácidos nucleicos e na divisão mitótica das células (LESTER apud DAMASCENO, 1996). Contudo, em determinadas condições, o Zn e seus compostos podem apresentar características tóxicas. CLÁUDIO (1987), menciona a existência de relatos da contaminação por Zn resultante do consumo de alimentos ácidos e bebidas acondicionadas em recipientes metálicos galvanizados.

O Zn, a exemplo de quase todos os metais pesados, também provoca a morte de peixes por ação oligodinâmica, além de ser considerado um algicida (CLÁUDIO, 1987).

Os sintomas de toxicidade por Zn são: vômitos, desidratação, dores de estômago, náusea, desmaios e descoordenação dos músculos (DAMASCENO, 1996).

3.2- RESÍDUOS SÓLIDOS

Antes da discussão específica sobre o resíduo gerado no processo de fundição - areia de fundição de descarte, convém lembrar que os mesmos estão inseridos em um contexto mais amplo, o estudo dos Resíduos Sólidos.

3.2.1- Classificação

Conforme especifica a NBR 10004 (1987), são classificados como Resíduos Sólidos: "Resíduos no estado sólido e semi-sólido, que resultam da atividade da comunidade 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 seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível."

Os resíduos sólidos são classificados em função do grau de periculosidade que apresentam, em 3 grandes categorias (NBR 10004, 1987):

-Resíduos Classe I - Perigosos: são definidos como todos os resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que, em função de suas características de toxicidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade, podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo para o aumento de mortalidade ou incidência de doenças, e/ou apresentam efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

-Resíduo Classe II - Não Inertes: são aqueles que não se enquadram na classificação de resíduos perigosos e não são considerados inertes.

-Resíduos Classe III - Inertes: são aqueles que submetidos ao Teste de Solubilização - conforme NBR 10006 (1987) - Solubilização de Resíduos - não têm nenhum dos seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos Padrões de Potabilidade da Água.

3.2.2- Resíduos sólidos do processo de fundição

Fundição é a conformação de um metal no estado líquido. Tal processo consiste em aquecer o metal até que ele se funda e se transforme em um líquido homogêneo. Em seguida, este líquido será vertido em moldes adequados onde ao solidificar-se, adquirirá a forma desejada (SIEGEL, 1979).

Nesta definição encontram-se implícitos dois grupos independentes de operações: aquelas operações que tem por finalidade fundir o metal, isto é, transformá-lo em um líquido homogêneo e as que tem por finalidade produzir o molde, qualquer que seja ele.

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 em seu estado líquido. Entre os processos de fundição o mais versátil é o molde de areia, usado na maior parte da produção mundial de fundidos, podendo ser empregado para produzir peças fundidas em quase todos os materiais e em tamanhos variados (KONDIC, 1973).

“A areia de fundição usada para a confecção dos moldes é um material heterogêneo constituído essencialmente de um elemento granular refratário, dito areia base (geralmente areia silicosa); de um elemento aglomerante, seja mineral (argila) ou orgânico (óleos, aglomerantes derivados de cereais, resinas, etc), usado para confecção de moldes monolíticos de fundição” (BROSCH & RÉ, 1965, p.3).

Para a obtenção das areias de fundição, existe uma variedade tanto de areia-base como de aglomerantes, cada um mostrando-se mais adequado a certo tipo de processo de fundição empregado, tamanho da peça a ser fabricada e tipo de metal que será utilizado. A areia-base é o constituinte presente em maior proporção nas areias de fundição e a escolha do tipo de areia a ser utilizada na moldagem é específica para cada tipo de fabricação, devendo ser fixado em função das características de utilização necessárias. Existem muitos tipos, 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, a mais adequada para fundição é a bentonita. É importante destacar que a areia de fundição responde pela maior parcela de peças fundidas produzidas em todo mundo, e que, no Brasil, prevalece esta situação, visto que cerca de 80% das fundições brasileiras utilizam tais areias.³

Segundo PEREIRA apud MAZARIEGOS (1995), 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 das areias de fundição em pequenas proporções e podem ser citados como exemplo: pó de carvão mineral, pó de madeira, piche, óxido de ferro.

As areias de fundição descartadas (resíduos) são provenientes de pedaços de moldes que se desagregam durante o processo. Os moldes inutilizados carregam consigo traços do material que nele foi fundido. Desta forma, o resíduo gerado durante o processo de fundição, tem seu grau de periculosidade caracterizado pela presença de metais pesados, daí a necessidade de uma disposição adequada.

³ SENAI - Departamento Regional de Minas Gerais. *Areias de fundição aglomeradas com argila* / Publicação técnica, Belo Horizonte, 1987.

As análises que devem ser realizadas no resíduo afim de poder classificá-lo, devem ser precedidas de uma coleta padronizada. O procedimento padrão de coleta de resíduos deste tipo está descrito detalhadamente na norma NBR 10007 (1987) - Amostragem de Resíduos.

As análises para caracterização do resíduo, consistem de ensaios de lixiviação e solubilização descritos com detalhes nas normas NBR 10005 (1987) e NBR 10006 (1987) respectivamente.

Uma vez realizados os ensaios citados e obtidos os resultados, deve-se consultar a norma NBR 10004 (1987) afim de poder caracterizar o resíduo em uma das três classes previstas (classe I ; classe II ; classe III) e assim, poder direcionar o destino do mesmo.

3.3- PROCESSO DE ENCAPSULAMENTO

A literatura apresenta-se confusa quanto a melhor definição para este processo, alternadamente denominado de solidificação, estabilização, fixação ou encapsulamento. Embora cada denominação traduza total ou parcialmente o conceito do processo, os termos foram considerados sinônimos neste trabalho.

3.3.1- Definição

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 (CLÁUDIO, 1987).

Segundo POON et al. (1986), 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.

Esta forma de tratamento oferece ainda, uma melhoria das condições de manuseio dos resíduos, pela produção de uma matriz monolítica com características e integridades físicas mais desenvolvidas, de forma a otimizar o seu transporte, estocagem, disposição e reutilização. Idealmente, essa modificação estrutural deve

reduzir substancialmente a lixiviabilidade dos contaminantes tóxicos (MERRITT et al., 1993).

3.3.2- Tecnologias desenvolvidas e aplicadas

Segundo CETESB (1985), existem vários processos e técnicas de fixação disponíveis, tais como: processo a base de cimento, processo a base de cal e materiais pozolânicos (não incluindo o cimento), processo a base de materiais pozolânicos, técnicas a base de polímeros orgânicos, técnicas de encapsulamento superficial, técnicas de auto-solidificação e outros. Como o objetivo deste trabalho é o estudo do encapsulamento com cimento em particular, os demais processos e técnicas serão brevemente comentados.

3.3.2.1- Técnicas baseadas em materiais pozolânicos (não incluindo cimento)

As pozolanas são materiais naturais ou artificiais contendo sílica ativa, a qual, em presença de água e cal forma silicatos de cálcio que apresentam propriedades aglomerantes (CLÁUDIO, 1987).

Os materiais pozolânicos mais comumente usados no tratamento de resíduos são as cinzas, poeiras de forno de cimento e escória de alto-forno, que são produtos residuais, com pequeno ou nenhum valor comercial. Até mesmo algumas argilas, xistos calcinados, tijolo moído, pedra-pome e cinzas de carvão geradas em toneladas em termoelétricas, são materiais que apresentam propriedades pozolânicas. O uso desses materiais para consolidar um outro resíduo é vantajoso para o processador, que pode tratar dois tipos de resíduos ao mesmo tempo (CETESB, 1985).

O baixo custo dos materiais empregados, disponíveis em larga escala, aliado ao fato desta técnica dispensar equipamentos especializados no processamento, bem como, o 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, o que geralmente é associado à baixa capacidade de retenção dos íons tóxicos, são os principais inconvenientes desta técnica (CLÁUDIO, 1987).

3.3.2.2- Técnicas baseadas em termoplásticos

Esta técnica foi desenvolvida para fixação de resíduos radioativos, podendo ser adaptada a resíduos industriais. Neste processo, os resíduos são previamente secos, aquecidos e dispersos numa matriz plástica aquecida. A mistura ainda em estado pastoso, é normalmente disposta em uma contenção secundária (por exemplo, tambor de aço), onde é esfriada para se solidificar (CLÁUDIO, 1987).

A mistura endurecida apresenta taxas de perda por lixiviação significativamente menores que as observadas em sistemas baseados em cimento ou outros materiais pozolânicos, além disso, o volume do produto final é bem reduzido e a maioria dos materiais termoplásticos resistem ao ataque de soluções aquosas (CETESB,1985) . Esta técnica apresenta, contudo, custo muito elevado, requerendo equipamentos caros e complexos, além de técnicos especializados. A incorporação de resíduo seco, o que requer grande quantidade de energia e a possibilidade de liberação de gases e odores durante o aquecimento de algumas misturas, bem como da decomposição de alguns compostos, são outros inconvenientes do processo (CLÁUDIO, 1987).

3.3.2.3- Técnicas de polímeros orgânicos

A técnica de solidificação com polímeros orgânicos mais testadas é o sistema uréia-formaldeído (U.F.). Recomenda-se, usualmente, efetuar a mistura do resíduo com um pré-polímero num receptáculo de lixo (tambor de aço) ou em um misturador especialmente projetado para tal. Quando esses dois componentes estão totalmente misturados, adiciona-se um catalisador, que provocará o endurecimento do polímero, continuando-se a misturar até que o catalisador esteja totalmente disperso. A mistura é completada antes que o polímero seja formado e transferida para os recipientes que acondicionarão o resíduo estabilizado (CETESB, 1985).

O material polimerizado não se combina quimicamente com o resíduo, mas forma uma massa esponjosa que captura as partículas sólidas. Isto representa um grande inconveniente do 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, devido à liberação de gases tóxicos, que normalmente ocorrem durante a reação de polimerização.

As vantagens do processo estão associadas ao pequeno volume e baixa densidade do material solidificado, quando comparado com outros processos. A quantidade de material solidificante necessária é, também, comparativamente baixa (CLÁUDIO, 1987).

3.3.2.4- Técnicas de encapsulamento

Os sistemas de encapsulamento propriamente ditos são aqueles nos quais os resíduos são inicialmente aglomerados, e a seguir, envoltos por uma camisa ou jaqueta de material inerte. O material de revestimento mais comumente utilizado é o polietileno, que é sujeito a danos quando exposto à temperaturas elevadas. Contudo, uma vez garantida a inviolabilidade da jaqueta, esta técnica oferece segurança total contra lixiviação de poluentes (CETESB, 1985).

O elevado custo, decorrente dos equipamentos sofisticados e mão-de-obra especializada, torna esta técnica pouco usada.

3.3.2.5- Técnicas de auto-solidificação

Alguns resíduos industriais, tais como os lodos de limpeza de exaustão ou dessulfurização, contém grandes quantidades de sulfato ou sulfeto de cálcio. Esta lama, quando calcinada, apresenta propriedades aglomerantes semelhantes às do cimento. Desta forma, essa tecnologia 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 calcinado sob condições cuidadosamente controladas, para produzir o aglomerante. Este resíduo calcinado é reintroduzido no lodo, juntamente com aditivos patenteados. Frequentemente são adicionadas cinzas para ajustar a umidade. O produto acabado é um material resistente, de baixa permeabilidade e com boa capacidade de retenção de metais pesados, eventualmente presentes no resíduo. As desvantagens do processo residem na necessidade de equipamentos especiais e energia adicional para se promover a calcinação (CLÁUDIO, 1987).

3.3.2.6- Vitrificação ou incorporação em materiais cerâmicos de resíduos perigosos

Algumas experiências têm sido desenvolvidas no sentido de se combinar resíduos radioativos ou extremamente perigosos com sílica e fundir a mistura em vidro ou formar um mineral de silicato sintético. Tanto o vidro como o silicato cristalino são lixiviados muito lentamente pela água, de ocorrência natural, o que faz com que este processo seja geralmente proposto para se produzir um material seguro quanto à disposição final, o qual não requer uma contenção secundária (CETESB, 1985). Todavia, esta técnica precisa estar associada a uma indústria de fabricação de vidros ou requer uma instalação específica muito dispendiosa, necessitando de energia intensiva, frequentemente acima de 1350°C, para que a mistura resíduo-silicato seja derretida. Além disso, existe a possibilidade de evaporação e dispersão de poluentes, principalmente metais pesados, antes da sua ligação à sílica derretida, em virtude das altas temperaturas do processo (CLÁUDIO, 1987).

Segundo CLÁUDIO (1987), outra possibilidade é a incorporação de resíduos à materiais cerâmicos. As principais desvantagens deste processo referem-se às dificuldades operacionais: transporte dos resíduos e adaptação das unidades fabris.

3.4- ENCAPSULAMENTO COM CIMENTO

A fixação de resíduos sólidos perigosos em matriz de cimento é a técnica de solidificação mais empregada, devido a simplicidade do processo e o custo baixo (DANIALI, 1990).

Segundo CETESB (1985), quando misturado com água, o cimento é hidratado, formando posteriormente um sólido rígido. A hidratação se dá em dois estágios, sendo que no primeiro ocorre a formação de uma membrana protetora 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 espaço intersticial. Tem-se, desta 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. Esta matriz cristalina incorpora os agregados e/ou resíduos adicionados na massa monolítica.

3.4.1- Vantagens e desvantagens

Segundo CETESB (1985), as vantagens dos sistemas de tratamento a base de cimento são:

- a matéria-prima (cimento) é abundante e barata;
- a tecnologia e o controle da mistura e o manuseio do cimento são bem 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 sendo, a quantidade de cimento a ser adicionada pode ser dosada em função do teor de água do 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 ou cloretos;
- as características de lixiviação do produto final, se necessário, podem ser melhoradas através de revestimento selante, e
- a quantidade de cimento usada pode variar, permitindo assim que os produtos finais tenham uma alta capacidade de suporte e se tornem bons materiais para construção civil.

As desvantagens deste sistema são:

- a necessidade de quantidades relativamente grandes de cimento, o que em parte é compensado pelo baixo custo do material. O peso e o volume do produto final são, normalmente, o dobro do de outros processos de fixação;
- a necessidade de aterros industriais bem projetados e construídos para a disposição de produtos finais não revestidos. Conforme foi observado na disposição de resíduos radioativos, alguns poluentes são liberados por lixiviação, especialmente por soluções levemente ácidas;
- a necessidade de efetivar um pré-tratamento ou utilizar cimentos especiais de custo mais elevado ou aditivos, caso os resíduos contenham grandes

quantidades de impurezas que afetem o endurecimento e a cura da mistura resíduo-cimento, tais como boratos e sulfatos, e

- a formação de amônia, a partir do íon amônio, devido a alcalinidade do cimento.

3.5- ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND

3.5.1- Definição

Uma argamassa pode ser definida como a mistura de aglomerantes e agregados miúdos, possuindo a capacidade de endurecimento e aderência. Sua denominação é função geralmente, do aglomerante utilizado.

As argamassas de cimento Portland são materiais amplamente utilizados na construção civil: no assentamento de alvenarias, no revestimento de elementos construtivos, contrapisos, na produção de blocos e argamassa armada, etc (PETRUCCI, 1993).

3.5.2- Materiais

3.5.2.1- Cimento Portland

A NBR 5732, 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 (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Os cimentos hidráulicos são definidos como os aglomerantes que não só endurecem através de reações com a água, como também formam um produto resistente à água. Os aglomerantes hidráulicos ou resistentes à água consistem essencialmente de cimento Portland e suas diversas modificações (BAUER, 1985).

Embora o cimento Portland consista essencialmente de vários compostos de cálcio, os resultados de análises químicas de rotina são expressos em termos de óxidos dos elementos presentes. Isto porque, a determinação direta da composição dos compostos requer equipamentos e técnicas especiais (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Além disso, costuma-se expressar os compostos individuais dos óxidos do clínquer usando-se as seguintes abreviações:

TABELA 3.2- Composição do cimento

ÓXIDO	ABREVIACÃO	COMPOSTOS	ABREVIACÃO
CaO	C	3CaO . SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2CaO . SiO ₂	C ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3CaO . Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4CaO . Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	4CaO . 3Al ₂ O ₃ . SO ₃	C ₄ A ₃ S
SO ₃	S	3CaO . 2SiO ₂ . 3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H ₂ O	H	CaSO ₄ . 2H ₂ O	CSH ₂

fonte: MEHTA & MONTEIRO (1994).

A composição química dos compostos presentes nos cimentos Portland industriais não é exatamente a que é expressa pelas fórmulas comumente utilizadas: C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF. Isto ocorre porque nas altas temperaturas que prevalecem durante a formação do clínquer, os elementos presentes no sistema, inclusive impurezas como magnésio, sódio, potássio e enxofre, possuem a capacidade de entrar em soluções sólidas com cada um dos principais compostos do clínquer. Pequenas quantidades de impurezas em solução sólida podem não alterar significativamente a natureza cristalográfica e a reatividade de um composto com a água, porém grandes quantidades (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Resumindo, cal, sílica, alumina e óxido de ferro são os componentes essenciais do cimento Portland, e constituem, geralmente, 95 a 96% do total na análise de óxidos. A magnésia, que parece permanecer livre durante todo o processo de calcinação, está usualmente presente na proporção de 2 a 3%, limitada pelas especificações a um máximo permissível de 5%. No Brasil, esse limite é um pouco superior (6,4%). Os óxidos menores comparecem em proporção inferior a 1%, excepcionalmente 2% (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

A mistura de matérias-primas que contenha, em proporções convenientes, os constituintes anteriormente relacionados, finamente pulverizada e homogeneizada, é submetida à ação do calor no forno produtor de cimento até a temperatura de fusão incipiente, que resulta na obtenção do clinker. Nesse processo ocorrem combinações químicas, principalmente no estado sólido, que conduzem à formação dos compostos acima mencionados (BAUER, 1985).

Atualmente, existem vários tipos de cimento Portland, classificados de acordo com suas composições, características físico-químicas no estado natural e propriedades que apresentam no estado endurecido. No Brasil são produzidos vários tipos de cimento Portland, assim como: Cimento Portland Comum (CP I), Composto com Escória (CP II-E), de Alto Forno (CP III), Pozolânico (CP IV), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), e outros. Nesta pesquisa foi empregado o cimento Portland com escória CP II-E 32.

3.5.2.2- Agregados

O agregado é o material granular, tal como a areia, o pedregulho, a pedra britada ou escória de alto forno, que usado com um meio cimentante, forma o concreto ou a argamassa de cimento, como mencionado (PETRUCCI, 1993).

A qualidade dos agregados, utilizados na obtenção de argamassas de cimento Portland, pode ser avaliada através de alguns índices e características da sua composição, como: quantidade de substâncias nocivas (torrões de argila, materiais carbonosos, materiais pulverulentos), quantidade de impurezas orgânicas e forma dos grãos (BAUER, 1985).

Ao contrário do cimento, e embora ocupem 60% a 80% do volume da argamassa, os agregados são frequentemente considerados como um material de enchimento inerte e, portanto, não se dá muita atenção ao seu possível efeito nas propriedades da argamassa. Contudo, existem características dos agregados, tais como: tamanho, forma, textura da superfície, granulometria e mineralogia, que reconhecidamente influem na resistência, estabilidade dimensional e durabilidade da argamassa. Além destas propriedades importantes da argamassa endurecida, os agregados também têm um papel fundamental na determinação do custo e da

trabalhabilidade das misturas de argamassa; portanto, é impróprio serem tratados com menos respeito que os cimentos (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

- Areia de fundição aglomerada com argila

As argamassas de cimento Portland utilizam geralmente como agregado miúdo as areias naturais ou artificiais. Neste trabalho, em particular, investigou-se o uso dos rejeitos do processo de fundição (areia de fundição aglomerada com argila) como agregado.

As areias de fundição são classificadas de acordo com sua origem em: naturais, semi-sintéticas e sintéticas. As areias naturais são encontradas em depósitos contendo grãos de areia já envolvidos por aglomerante (argila), bastando adicionar certa quantidade de água. As semi-sintéticas são aquelas em que se adiciona algum elemento, além da água, para corrigir e melhorar sua composição. Já as sintéticas são obtidas a partir de elementos separados (areia-base, argila, etc), misturados então em proporções adequadas. Atualmente, poucas fundições utilizam as areias naturais ou semi-sintéticas, pois as sintéticas oferecem a possibilidade de um controle mais rígido de suas propriedades (PEREIRA apud MAZARIEGOS, 1995).

3.5.3- Propriedades

Como citado, a argamassa de cimento Portland é um material artificial, obtido após o endurecimento de uma mistura, em proporções adequadas, de agregado miúdo e pasta de cimento. Portanto, suas características e propriedades estão ligadas à quantidade e qualidade de seus materiais constituintes e à forma como são executadas as fases de preparação, lançamento e endurecimento (BAUER, 1985).

Na mistura dos materiais (argamassa no estado fresco), as propriedades que podem ser consideradas como as mais importantes são a consistência e a trabalhabilidade. Consistência é a propriedade da argamassa de se deformar sob a ação de uma força externa ou de seu peso próprio, ela é influenciada pela composição, tipo de cimento utilizado, teor água/materiais secos, composição granulométrica e forma dos grãos do agregado. A trabalhabilidade é uma propriedade subjetiva, pode variar de acordo com diferentes tipos de utilização da argamassa, porém pode ser definida como a maior ou menor facilidade com que a argamassa é

utilizada sem que haja segregação de seus componentes. A trabalhabilidade normalmente é determinada através da consistência, porém podemos ter argamassas trabalháveis com diferentes consistências (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Várias são as propriedades que a argamassa deve apresentar após solidificada (argamassa no estado endurecido), e a importância varia de acordo com sua utilização final (BAUER, 1985).

Finalmente pode-se dizer que, na confecção de uma argamassa de cimento é necessário que se determinem a qualidade e as proporções mais adequadas de cada um de seus componentes, visando que:

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

3.6 - APRESENTAÇÃO DE TRABALHOS SOBRE ENCAPSULAMENTO DE RESÍDUOS

À seguir, são apresentadas algumas pesquisas recentemente publicadas sobre o desempenho das técnicas de encapsulamento de resíduos sólidos.

Deve ser ressaltado, que o lento desenvolvimento dessa técnica contribui para a escassez de informações sobre o assunto, comparativamente com outras áreas do saneamento ambiental. Grande parte da literatura disponível é genérica, de caráter apenas informativo quando não comercial.

Ainda que limitada, a bibliografia consultada, é a base conceitual para realização desta pesquisa, tendo em consideração que as afirmações e conclusões mencionadas, são resultados de trabalhos distintos que embora tratem do assunto, não empregam especificamente a areia de fundição de descarte. Sendo assim, este trabalho visa além dos objetivos já explicitados, contribuir para o acréscimo de informações e conceitos sobre o processo. É importante destacar, que as normas citadas no texto, forneceram as diretrizes para a execução da fase experimental da pesquisa.

3.6.1- Solidificação de lamas galvânicas com cimento

No trabalho realizado por CLÁUDIO (1987), foram apresentados, avaliados e discutidos os experimentos e os resultados obtidos da solidificação com cimento de lama gerada no tratamento de efluentes galvânicos. Foram pesquisadas misturas de resíduo com Cimento Portland Comum (CPC), Pozolânico (POZ) e de Alto Forno (CAF), hoje, correspondentes aos cimentos CP I, CP IV e CP III, respectivamente. Para cada tipo de cimento foram preparadas misturas com relações água/cimento iguais a 0,3; 0,5 e 0,7.

Os resultados obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização realizados aos 7, 28 e 90 dias nas matrizes solidificadas permitiram, em síntese, concluir que a técnica estudada foi apropriada para a fixação dos íons tóxicos presentes nas lamas galvânicas, o que, em essência, era o objetivo fundamental dos experimentos. Os resultados dos ensaios mecânicos, mostraram um comportamento surpreendente das matrizes ensaiadas. Enquanto nas primeiras idades as resistências situaram-se muito abaixo dos valores esperados, nas idades mais avançadas as resistências foram altas, superando, inclusive, as verificadas em argamassas e concretos de cimento Portland.

A seguir, são listadas as principais conclusões e tendências observadas nos experimentos (CLÁUDIO, 1987).

- As medidas de consistência, não têm para as misturas pesquisadas, o mesmo significado que para as argamassas e concretos de cimento Portland, onde este parâmetro está, em geral, diretamente relacionado com a resistência final do material solidificado. As variações das consistências das misturas frescas de lama e cimento não têm, aparentemente, grande influência na resistência final da mistura solidificada (dentro do intervalo de tempo pesquisado).

As misturas de resíduo e cimento apresentaram valores de consistência menores (menor fluidez) que as pastas de referência (sem adição de lamas tóxicas) de água e cimento para as mesmas relações a/c^4 . Estas diferenças de consistência entre estes dois materiais, podem ser atribuídas ao fato da lama apesar de sua grande umidade, levar consigo quantidades consideráveis de partículas sólidas dos hidróxidos metálicos.

Já com referência ao tipo do cimento, de uma maneira geral, os valores obtidos

⁴ a/c . Relação água-cimento, em massa.

indicaram ser as misturas de Cimento Pozolânico (POZ) sensivelmente mais rígidas que as misturas de Cimento de Alto Forno (CAF), e estas mais rígidas que as de Cimento Portland Comum (CPC), o que também não obedece nenhuma relação com as resistências finais das matrizes solidificadas.

- Nas primeiras idades, as misturas com CPC são as que melhores resultados apresentaram, no que se refere às resistências mecânicas. Em seguida, vêm as misturas de CAF, sendo as misturas de POZ as que menores resistências apresentam até a idade de 28 dias. Para os traços mais pobres em cimento, as misturas de CPC e CAF já apresentaram, aos 7 dias, resistências próximas às verificadas aos 90 dias, as quais apesar de muito baixas quando comparadas às resistências das pastas de referência, já permitem a manipulação, transporte e até o uso para fins não estruturais das matrizes solidificadas. Acreditava-se, a princípio, que as misturas apresentariam resultados de resistência mecânica muito acima dos valores obtidos.

- Os componentes da lama, indiscutivelmente, interferem nas reações de hidratação do cimento, retardando o endurecimento das misturas. Os resultados de resistência mecânica obtidos sugerem que o Zn, presente em concentrações elevadas na lama bruta, pode ter sido fator determinante no retardamento do endurecimento verificado nas misturas.

Esta hipótese tornou-se mais provável, quando observou-se nas misturas mais pobres em cimento, onde a proporção de lama e, conseqüentemente, de Zn é maior, o retardamento do endurecimento mesmo na idade de 90 dias. Todavia, o efeito do retardamento do endurecimento para a maioria das misturas de POZ, deixou de ser observado nos ensaios efetuados na idade de 90 dias. Verificou-se, portanto, que para o cimento pozolânico, a interferência dos compostos de lama é praticamente anulada nas maiores idades.

O que foi observado, é que nas idades ainda mais elevadas, a interferência dos compostos de lama, mesmo nas misturas de CPC e CAF, tendem a desaparecer, a exemplo do que se verificou nas misturas de POZ aos 90 dias.

Finalmente, concluiu-se que as matrizes solidificadas da lama em questão, podem, a longo prazo, apresentar propriedades superiores a de muitos

materiais usualmente empregados na construção civil.

- Com referência à relação a/c, em resumo, o que se observou da análise dos resultados até 28 dias para os três tipos de cimento, é que a resistência mecânica, em termos práticos não difere muito para as três relações a/c pesquisadas. Isto indicaria que, apenas em termos de resistência mecânica, não se justificaria o emprego de quantidades excessivas de cimento para a solidificação de lamas com as características da utilizada nos experimentos. Por outro lado, com os resultados aos 90 dias, verificou-se que a diferença entre misturas com relação a/c 0,3 e 0,5 equivale à diferença entre um material estrutural e um material com resistência inferior a de tijolos de barro. No entanto, a análise global dos resultados dos ensaios de resistência mecânica permite admitir a hipótese do desaparecimento ou diminuição, em idades mais avançadas as que se restringiu esta pesquisa, do efeito inibidor do endurecimento pelos compostos de lama, mesmo nas misturas pobres em cimento.

Os resultados dos ensaios aos 90 dias das misturas de POZ permitem afirmar que a solidificação das lamas galvânicas com cimentos, mesmo quando a resistência mecânica das matrizes for também uma propriedade desejável, pode ser pesquisada com relações a/c maiores que as utilizadas nos experimentos.

- De acordo com os resultados do ensaio de lixiviação efetuado na lama bruta, a mesma foi classificada como resíduo perigoso. As matrizes solidificadas, segundo a NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação, enquadraram-se na categoria de Resíduos não perigosos - Não Inertes (classe II). Deve ser lembrado, no entanto, que o único parâmetro responsável por essa classificação é o Al. Metais de maior toxicidade, como Cd, Hg, e Pb, ou metais presentes em grandes proporções na lama, como, Cu, Ni, Cr ou Zn, situaram-se no extrato do ensaio de solubilização em concentrações que permitiriam classificar o resíduo como Inerte (classe III).
- Todas as misturas ensaiadas, mesmo as mais pobres em cimento, demonstraram, já aos 7 dias, alta eficiência na fixação dos metais pesados presentes na lama empregada nos experimentos. Independentemente de outras

considerações, os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização demonstraram que a solidificação de lamas galvânicas com cimento é indiscutivelmente um processo de alta eficiência para o tratamento e destoxificação das mesmas.

Embora as diferenças de desempenho na fixação dos poluentes entre as diversas misturas ensaiadas sejam mínimas, variando entre 97% e 99,9% ou mais de eficiência, algumas misturas mostraram-se mais apropriadas que outras. A solidificação com CPC eliminou a periculosidade da lama; a eficiência de fixação dos metais foi maior nas misturas mais ricas em cimento e, em geral, aumentou com a idade e foi proporcional à resistência mecânica da matriz. Nas misturas com POZ, observou-se que mesmo nas primeiras idades e nas misturas mais pobres em cimento (que ainda não ofereceram resistência mecânica) os metais são fixados em níveis suficientes para eliminar a periculosidade do resíduo tratado. Também em linhas gerais, são válidas para estas misturas, as mesmas conclusões tiradas nas misturas de CPC. Embora os resultados dos ensaios de lixiviação dos dois tipos de misturas tenham sido similares, observou-se que, principalmente aos 90 dias, as matrizes de CPC demonstraram um desempenho levemente superior as de POZ, no que se refere à capacidade de fixação dos metais tóxicos. Com relação às misturas com CAF, pôde-se deduzir que são eficientes para eliminar a periculosidade da lama, fixando os metais em níveis superiores a 97,23% (pior desempenho verificado para o níquel aos 7 dias na mistura com relação a/c 0,3). Diferentemente dos demais cimentos, a capacidade de fixação dos metais por CAF aumenta muito pouco com a idade. O aumento de capacidade de fixação não aumenta na mesma proporção que o aumento da resistência mecânica da matriz. Com relação aos demais cimentos, o CAF foi o que demonstrou, em média, o pior desempenho na fixação dos metais pesados.

- Os resultados dos ensaios de lixiviação permitem concluir que a solidificação com cimento não se mostra, aparentemente, adequada para o tratamento de resíduos com altos teores de Ba, que venham a ser dispostos em aterros sanitários ou outros ambientes ácidos.

- As matrizes solidificadas com cimento, classificadas como resíduo não perigoso, podem, assim, ser dispostas em aterros sanitários, sem riscos de lixiviação de metais pesados em concentrações preocupantes.
- Nas condições neutras dos ensaios de solubilização realizados após 90 dias, ficou também demonstrada a grande eficiência das matrizes na fixação dos metais pesados, notadamente do Zn, Ni, Cu e Cr. Conforme ficou evidenciado, nas condições de pH neutro dos ensaios de solubilização, o Al foi o metal de mais baixa fixação nas matrizes. Isto sugere que, para lamas com grandes concentrações de Al, as técnicas de solidificação com cimento (e possivelmente com outros silicatos alcalinos) não são tão eficientes e recomendáveis como para outros metais. Deve aqui ser lembrado que, nas condições ácidas (pH=5) dos ensaios de lixiviação, o Al não foi detectado na quase totalidade dos extratos.
- Tomando-se como referência o Cr e o Cu, verificou-se, também, pelos resultados dos ensaios de solubilização, serem as matrizes de CPC, ligeiramente mais eficientes na fixação dos metais que as de POZ e estas que as de CAF.
- Mesmo apresentando boa eficiência na fixação dos metais pesados, pelo fato das matrizes obtidas nos experimentos terem sido pelos critérios da ABNT, enquadradas na classe II - Resíduos não perigosos mas não inertes - a disposição das mesmas ainda exigiria cuidados especiais. Assim, associada a uma instalação de solidificação das lamas galvânicas com as características das utilizadas nos experimentos, deve ser prevista uma área adequadamente preparada, para disposição das matrizes solidificadas.
- Com relação aos aspectos econômicos, verificou-se que uma eventual aplicação prática dos resultados dos experimentos conduziria a custos elevados por tonelada de resíduo tratado. Isso conduz à necessidade de se pesquisar misturas mais pobres em cimento (com conseqüente aumento do efeito de retardamento no endurecimento) ou a incorporação de agregados à mistura, para diminuir o custo por unidade de volume da matriz solidificada, visando

uma possível comercialização da mesma como blocos para construção civil. Todavia, se o resíduo solidificado for disposto em aterro ou simplesmente armazenado é desaconselhável a incorporação de agregados inertes ou outro tipo de cargas, as quais só aumentariam desnecessariamente o volume do material a ser descartado. Comparando-se porém os custos de solidificação com cimento, mesmo nas condições dos experimentos, com os de incineração, verifica-se que a técnica estudada mostra-se viável e justificável no tratamento de resíduos perigosos, notadamente nas lamas com altas concentrações de metais pesados.

- Lamas galvânicas, com baixas concentrações de Al, podem, após solidificação com cimento, ser classificadas como resíduos inertes, segundo os critérios da ABTN. Nesse casos, as restrições para os usos das matrizes solidificadas como materiais de construção civil podem ser abrandadas.

CHAMIE (1993), trabalhando também com lamas galvânicas, procurou enquadrar os resíduos objeto da pesquisa, em uma classe menos agressiva ao meio ambiente, através do encapsulamento em matrizes de cimento; determinar o motivo deste novo enquadramento, se físico ou químico; e indicar quais as possíveis utilizações do material encapsulado.

Para isso, foram confeccionados corpos de prova com argamassa composta de resíduo e Cimento Portland com Escória (CP II-E), de traços cimento:resíduo seco 4:1, 5:1, 6:1, 7:1 e 8:1 e foram estabelecidas as idades de 7, 28, e 90 dias para a realização de todos os ensaios.

Os resultados obtidos indicaram que para relações cimento:resíduo iguais ou superiores a 6:1, a matriz cimentícia pode ser classificada como resíduo inerte, devido ao encapsulamento físico, obtido pela retenção mecânica das partículas do resíduo, que são maiores que os poros da matriz, e ao encapsulamento químico, proporcionado pela incorporação dos elementos constituintes do resíduo à estrutura cristalina da matriz.

Um dos resíduos utilizados era proveniente de uma unidade de fabricação de circuitos impressos que utilizava o processo "aditivo", baseado na cobreação por oxi-

redução na construção das trilhas condutoras sobre placas básicas sem laminado de cobre.

O outro resíduo utilizado era proveniente de uma unidade de fabricação de metais sanitários que utilizava processos convencionais de deposição de metais, Cr, Zn e Ni, em bases plásticas e metálicas, estas últimas, constituídas, entre outros elementos, de Cd, Fe e Pb.

A umidade natural dos resíduos foi previamente determinada, permitindo desta forma, que a quantidade de água acrescentada à argamassa, a fim de adequá-la à trabalhabilidade e consistência requerida, fosse controlada.

Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de lixiviação e solubilização com o intuito de classificá-los; aos ensaios de porosidade ao Hg, porosidade ao N₂, difratometria de raios-X e granulometria a raios-X, a fim de determinar se a estabilização do resíduo se deu por via física ou química; e ao ensaio de resistência mecânica, para direcionar quais seriam as possíveis utilizações do material.

As principais conclusões e recomendações são citadas abaixo (CHAMIE, 1993).

- Os resultados de todos os ensaios de lixiviação realizados, apresentaram teores de metais no extrato lixiviado inferiores aos padrões estabelecidos pela NBR 10005 - Lixiviação de Resíduos, permitindo desta forma, que se afirme que a tecnologia de encapsulamento destes resíduos em matrizes de cimento foi eficiente na sua reclassificação, segundo a NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação, de resíduos classe I - perigosos, em resíduos classe II - não inertes.
- Os resultados dos ensaios de solubilização, apresentaram para os traços maiores que 6:1, teores de metais no extrato solubilizado inferiores aos padrões estabelecidos pela NBR 10006 - Solubilização de Resíduos, permitindo desta forma, que se afirme que a tecnologia de encapsulamento destes resíduos em matrizes de cimento foi eficiente na sua reclassificação, segundo a NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação, de resíduos classe I - perigosos em resíduos classe III - inertes, classificação na qual são enquadradas as rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente.

- Os ensaios de resistência apresentaram valores muito dispersos em sua maioria, com tendência de elevação ao longo do tempo, sendo que em alguns casos foram constatadas altas resistências iniciais seguidas de suave declínio, e em outros baixa resistência inicial e forte declínio com o tempo. Este comportamento foi relacionado ao baixo grau de homogeneização da massa utilizada na confecção dos corpos-de-prova, o qual foi comprometido pelo equipamento de laboratório utilizado.
Apesar do alto grau de dispersão, os resultados obtidos indicaram que a matriz solidificada pode vir a ser um material diferenciado no que tange à sua resistência mecânica à compressão, já que foram encontrados valores de tensão de ruptura média que apresentaram um grande intervalo de variação.
- Os ensaios de solubilização e lixiviação também foram prejudicados pelo baixo grau de homogeneização proporcionado pelo equipamento de mistura utilizado, o que foi constatado pela inspeção visual dos corpos-de-prova ensaiados, na superfície dos quais haviam grãos de resíduo bruto.
- Os resultados dos ensaios de porosidade ao Hg e ao N₂ e de granulometria, permitiram afirmar que a matriz de cimento retém fisicamente os grãos de resíduo, já que estes têm diâmetro esférico equivalente compreendido entre 0,5 micra e 20 micra, e diâmetro esférico equivalente médio de 5 micra, enquanto o diâmetro médio dos poros da matriz cimento:resíduo determinado no porosímetro de Hg varia de 0,054 micra a 8,75 micra e no porosímetro de N₂ varia de 0,009 micra a 0,023 micra.
- A difratometria de Raios-X indicou os compostos presentes na matriz formados pelos metais provenientes dos resíduos, no caso, Pb, Cd, Cr, Zn, Ni e Fe, demonstrando que tais espécies químicas encontram-se retidas, enclausuradas no retículo cristalino da referida matriz.

3.6.2- Estudo da lixiviabilidade de resíduos sólidos contendo metais pesados

É comum que resíduos contendo metais pesados recebam um tratamento como a solidificação antes de serem dispostos em um aterro. Com o intuito de avaliar

a conveniência da solidificação do resíduo para aterramento, um procedimento definido MTCLP (Multiple Toxicity Characteristic Leaching Procedure) foi introduzido por LEE et al. (1994), para estudar a lixiviabilidade dos resíduos solidificados a longo prazo, sendo designado por combinar extrações múltiplas e características tóxicas dos extratos lixiviados. Este trabalho apresenta e discute este procedimento experimental, bem como, os resultados das análises químicas realizadas.

Um resíduo contendo Hg e suas amostras solidificadas com dois tipos de cimento foram avaliados pelo MTCLP. As amostras lixiviadas do material bruto e solidificado foram conservadas para determinação dos níveis de concentração dos poluentes de interesse, no caso: Cu, Cr, Cd, Pb, Zn, Ni e Hg.

Os resultados obtidos com a primeira extração, mostraram que o resíduo bruto apresentou as maiores concentrações de poluentes investigados, estando porém, apenas a concentração de Hg acima do limite permitido. Desta forma, este resíduo ficou caracterizado como perigoso, enquanto as amostras de resíduo solidificado puderam ser consideradas não perigosas, indicando que a técnica de solidificação empregada neste estudo foi capaz de reduzir a lixiviabilidade do Hg.

Os resultados analíticos da segunda até a décima extração revelaram que não houve quantidade significativa de Cu, Cr, Cd, Pb, Zn e Ni lixiviada das amostras. Desta forma, baseado nos resultados do teste MTCLP, concluiu-se que estes poluentes não apresentariam potencialidade de risco ao meio ambiente.

Conforme exposto anteriormente, o Hg é o único contaminante que poderia causar problemas ambientais. Comparando as concentrações de Hg obtidas pelo MTCLP das três amostras, é claro que o lixiviado da amostra bruta teve a maior quantidade de Hg, já que não recebeu tratamento. Contudo, não é possível concluir que a solidificação é um tratamento efetivo, já que existe a possibilidade das concentrações totais de Hg das amostras solidificadas serem menores comparadas com a amostra bruta. Para verificação da real eficácia da solidificação, a porcentagem em peso do Hg lixiviado e a porcentagem em peso acumulada de Hg lixiviado para cada extração, de cada amostra, foi calculada. Foi verificado que após dez extrações, um total de cerca de 10,5% do peso total em Hg foi lixiviado da amostra bruta, enquanto que menos de 0,5% para qualquer uma das outras amostras. Desta forma,

concluiu-se que a técnica de solidificação pode efetivamente reduzir o potencial de risco causado pela lixiviação de Hg.

3.6.3- Interferências no processo de encapsulamento provocadas pela presença de determinados compostos

Segundo CETESB (1985), o endurecimento e a cura do cimento Portland podem ser retardados, por muitos dias, pela presença de impurezas tais como matéria orgânica, siltes, argila ou carvão, assim como, a presença de materiais insolúveis na forma de pó (partículas que passam pela peneira de nº 200), podem acarretar na formação de partículas maiores, causando a diminuição da resistência da ligação entre estas e o cimento.

O tempo de endurecimento da mistura, bem como a resistência física, podem sofrer variações significativas em função da presença de sais solúveis de manganês, estanho, zinco, cobre e chumbo, sendo que os três últimos sais são os mais prejudiciais. Outros compostos que também atuam como retardadores do endurecimento do cimento Portland, mesmo que presente em baixas concentrações (algumas gramas por quilo de cimento), são os sais de sódio, tais como arseniato, borato, fosfato, iodato e sulfito.

Além de retardar o endurecimento, produtos contendo grandes quantidades de sulfatos, assim como os provenientes da lavagem de gás de exaustão ou combustão, podem reagir e formar sulfa-aluminato de cálcio hidratado, causando fragmentação ou aumento de volume do material solidificado. Para prevenir tal reação, dada a solidificação de resíduos com altas concentrações de sulfatos, foi desenvolvido um cimento especial com baixo teor de alumina.

- Aditivos

Com a finalidade de melhorar as características físicas da mistura e diminuir as perdas por lixiviação de resíduos fixados, muitos aditivos foram desenvolvidos para serem usados com o cimento.

Em alguns trabalhos experimentais realizados com resíduos radioativos, observou-se que a adição de vermiculita ou argila como absorvente, melhorou as condições de fixação desses resíduos (CETESB, 1985).

Os silicatos solúveis tem sido utilizados como aditivos nos processos a base de cimento para reter os contaminantes, mas esses causam um aumento de volume durante o endurecimento da mistura resíduo-cimento.

Como uma adaptação do processo à base de cimento, foi proposta uma técnica, na qual são dissolvidos resíduos ricos em metais com sílica de granulação fina, em pH baixo, sendo posteriormente elevado até 7. O gel resultante é adicionado ao cimento e endurece em um período de três dias (CETESB, 1985).

De acordo com os testes efetuados, a mistura de silicato de sódio e cimento Portland endurece rapidamente, sem que os íons metálicos afetem esse processo. Aparentemente, o silicato de sódio precipita a maioria dos íons inibidores que estão presentes na massa gelatinosa, eliminando suas interferências e acelerando o endurecimento da mistura cimento-resíduo. Dos resíduos testados, somente aqueles contendo ácido bórico inibiram o endurecimento das misturas.

Portanto, a formação de um gel é um fato importante no desenvolvimento dessa técnica. Além disso, uma demora no endurecimento e uma diminuição da resistência final do produto, podem ser causadas por excessiva agitação do gel depois de formado.

- Impregnação com polímeros

O processo de impregnação com polímeros, pode ser usado para diminuir a permeabilidade das misturas de resíduos com cimento. Os poros do produto final são preenchidos com monômeros de estireno, por imersão. A seguir o material de imersão é aquecido para que ocorra a polimerização. Através deste processo tem-se um aumento significativo da resistência e da durabilidade do produto final (CETESB, 1985).

3.6.4- Influência dos metais na cura do cimento

Nas pesquisas sobre solidificação de resíduos perigosos, certos metais são considerados poluentes prioritários, como: Pb, Cr, Hg, Zn, Cd, Se, As, Ba e Ag. Utilizando misturas de poluentes com materiais cimentícios COCKE et al. (1989), observaram que íons Pb provocaram um retardamento da cura da matriz solidificada. O interesse maior foi descobrir como isso poderia refletir na estabilidade de sistemas

solidificados contendo Pb. Em um recente programa para examinar a natureza da ligação dos metais poluentes com o cimento Portland, foram obtidos resultados pelo XPS (x-ray photoelectron spectroscopic) que permitiram propor um modelo do retardamento da cura do cimento pelo Pb.

Foram preparadas amostras de cimento Portland onde Pb e Cr foram dosados na forma de solução aquosa de sais de nitrato. Nas comparações entre o Cr^{+3} e Pb^{+2} ficou evidente a substancial diferença nas intensidades de definição dos elementos. Como o XPS é um instrumento de grande sensibilidade à estabilidade superficial, houve uma clara indicação que o Pb estava na superfície das partículas de cimento enquanto que o Cr foi pouco detectado. Além disso, a elevada definição da curva do Pb indicou que este elemento estava disperso sobre a superfície das partículas de cimento. Esta observação combinada ao fato de que sais de Pb, como carbonatos, sulfatos e outros são extremamente insolúveis e apresentam baixa energia superficial, sugere que íons Pb cobrem a porção externa dos componentes do cimento: Ca_2SiO_4 (C_2S), Ca_3SiO_5 (C_3S) e $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ (C_3A). Ficou então concluído que sais insolúveis de Pb formam uma cobertura semelhante a uma gelatina na maioria dos componentes do cimento, agindo como uma barreira para difusão de água, que atrasa a razão de hidratação e resulta no retardo da pega.

3.6.5- Efeito de componentes orgânicos em processos de encapsulamento com cimento

Dentro da indústria da construção, uma larga série de materiais orgânicos têm sido empregados para melhorar o desempenho e trabalhabilidade de misturas de cimento. Tais materiais são rotineiramente introduzidos para retardar a cura durante o transporte, aumentar a resistência final do cimento e outros fins. Embora o efeito inibidor de orgânicos na cura do cimento, venha sendo utilizado por vários anos para benefício da indústria da construção, os mecanismos distintos de interação cimento-material orgânico são pouco conhecidos, apesar da postulação de vários modelos de interferência. Experiências com uma variedade de aditivos orgânicos, têm mostrado que eles podem ter um efeito danoso na hidratação de materiais cimentícios (POLLARD et al., 1991).

forma, a contribuição de POLLARD et al. (1991), foi a de fornecer subsídios para um maior esclarecimento do comportamento de compostos orgânicos em processos de solidificação com cimento.

Um exemplo da complexidade que circunda as interações de orgânicos com cimento é o efeito do fenol e substitutos semelhantes na pasta de cimento hidratada (POLLARD et al., 1991). Os produtos solidificados foram examinados intermitentemente através de ensaios de lixiviação, microscopia ótica, difração de raio-X e espectroscopia. Os resultados demonstraram que foram observadas diferenças significativas relativas às características físicas, morfológicas e de composição das matrizes. Os autores, desta forma, concluíram que até mesmo alterações sutis na estrutura química do interferente orgânico, pode resultar em maiores diferenças na natureza da interação cimento-material orgânico.

Numa tentativa de esclarecer a possível interferência de um elemento particular na solidificação com cimento, muitas pesquisas têm investigado as interações entre materiais orgânicos individuais e cimento. Fenol, por exemplo, apresentou um efeito desfavorável no desenvolvimento da resistência a longo prazo. Triclorobenzeno reduziu o diâmetro médio do poro das partículas de cimento em que foi incorporado, mas não apresentou lixiviação significativa.

Pesquisas sobre pastas de cimento com materiais orgânicos, têm mostrado que em geral, orgânicos apolares não restringem o desenvolvimento da resistência do sistema solidificado. Compostos orgânicos residuais contendo hidróxidos (açúcar, álcool) e carboxilas (ácidos), podem ser usados para inibir ou mesmo evitar a hidratação do cimento completamente.

Os trabalhos conduzidos por WEITZMAN (1990), mostraram que o cimento e outros tipos de ligadores não estabilizam compostos orgânicos muito bem. Na verdade, o ato da mistura do resíduo, libera uma porcentagem significativa dos material orgânico presente para o ar. Além disso, a adição de ligantes eleva a temperatura dos resíduos durante a mistura, facilitando as emissões. Os resultados de uma série de testes que experimentaram a solidificação de compostos orgânicos, revelaram que grandes porções de constituintes orgânicos foram volatilizados durante a mistura. Além disso, parte dos constituintes orgânicos restantes, continuaram a volatilizar da matriz solidificada durante um determinado tempo.

revelaram que grandes porções de constituintes orgânicos foram volatilizados durante a mistura. Além disso, parte dos constituintes orgânicos restantes, continuaram a volatilizar da matriz solidificada durante um determinado tempo.

Embora essa série de testes seja um fraco fundamento para permitir generalizações, no entanto, possibilita o questionamento teórico de um mecanismo que permite a imobilização de orgânicos por um processo de solidificação/estabilização.

Com exceção de umas poucas reações fracas, o autor não teve conhecimento de algum mecanismo que pôde fazer mais do que aprisionar fisicamente os constituintes orgânicos. Os poucos casos onde algumas formas de reação química ocorreram, essas reações foram muito fracas e rapidamente anuladas em solução aquosa.

Testes mais recentes deram alguma indicação do sucesso da estabilização de níveis relativamente baixos de pentaclorofenol (PCB). Esses resultados foram animadores e indicaram que é possível reduzir a mobilidade desses materiais, provavelmente devido o aprisionamento físico do material na matriz solidificada, favorecida pelo fato deles geralmente não serem muito móveis no ambiente.

Para resíduos contendo compostos orgânicos e metais, existe a possibilidade de remoção dos orgânicos voláteis e semi-voláteis anterior ao tratamento por solidificação do resíduo. Por exemplo, "air stripping" tem sido usado para remover orgânicos voláteis; "steam stripping" pode remover compostos semi-voláteis. Pode até ser possível tirar vantagem do calor de hidratação de certos ligantes, especialmente aqueles contendo cal, para remover orgânicos do resíduo durante o processo de mistura (WEITZMAN, 1990).

3.6.6- Resíduos tratando resíduos

"Resíduos tratando resíduos" e recuperação com reutilização de recursos, são os assuntos básicos estudados por YANG et al (1994). Neste trabalho, dois resíduos industriais: um lodo de galvanoplastia e um lodo tendo como componente principal o carbonato de cálcio, aqui referido como lodo carbonato de cálcio; foram misturados em iguais quantidades e moídos. Em seguida, esta mistura foi aquecida a 1000° C por quatro horas e então resfriada. O material resultante foi moído e levado à teste, para

verificação da possibilidade do seu emprego como material ligante, na solidificação com cimento do lodo original da galvanoplastia, ou seja, o produto dessa mistura de lodos foi usado para substituir parte do cimento Portland. Os sistemas solidificados empregando o material produzido com lodos (grupo experimental) e os sistemas solidificados apenas com cimento (grupo controle), foram então testados para determinação da resistência à compressão, lixiviação e durabilidade.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de resíduos solidificados, mostraram que a resistência obtida pelo grupo experimental foi maior do que a correspondente no grupo controle.

Foram realizados ensaios de lixiviação com o intuito de indicar os efeitos da substituição do cimento pelo material produzido. O grupo experimental apresentou uma menor concentração de Zn que no correspondente grupo controle. As concentrações de Zn no lixiviado foram todas menores que o limite permitido. Para o Cd, contudo, as concentrações do lixiviado do grupo experimental são um pouco maiores que do grupo controle. Novamente, essas concentrações de Cd são todas muito menores que o limite.

Outro ensaio realizado, o MTCLP, foi designado para simular a lixiviação do resíduo solidificado, resultante de repetidas precipitações de chuva ácida.

Este teste foi realizado para o lodo bruto de galvanoplastia e para as amostras solidificadas do grupo experimental, que apresentaram as maiores resistências à compressão. Foi observado que a solidificação reduziu a porcentagem acumulada de Zn e Cr lixiviado.

Análise de difração de raio-X da mistura de lodos aquecida, mostrou que o produto final é um material muito complexo. Este material, contudo, demonstrou destacada capacidade ligante na solidificação do resíduo. Para melhor entendimento da composição do material produzido e seus mecanismos de reação com os metais pesados, foram recomendados estudos adicionais.

3.6.7- Encapsulamento de metais pesados em matrizes de cimento melhoradas

A alta porosidade da matriz de cimento, vista como responsável pela considerável lixiviação de metais, principalmente o Pb, criou o interesse de melhoramento dessa matriz. Nesse sentido, o objetivo de DANIALI (1990), foi

investigar a eficiência da técnica de solidificação de resíduos contendo Pb e Cr em matriz de cimento melhorada com latex.

A lixiviação de elementos encapsulados em matrizes de cimento Portland tem sido o objeto de numerosos estudos, que focalizam o princípio químico envolvido no processo de solidificação/estabilização. Comparativamente, menor atenção tem sido dada aos fatores que afetam as propriedades da matriz. Segundo DANIALI (1990), um conhecimento da composição do cimento Portland, torna possível prever as propriedades da pasta de cimento. Além disso, é possível através do adequado ajuste da composição do composto, modificar certas propriedades do cimento que tornarão mais satisfatória sua performance. A relação água/cimento (a/c) é um parâmetro muito importante, influenciando nas propriedades da pasta de cimento endurecida, como: resistência, durabilidade e porosidade. Quando a pasta de cimento Portland é preparada e curada de forma convencional, considerável porosidade capilar está presente na pasta. Pois bem, se a água presente nos poros capilares do cimento fosse removida e substituída com materiais compatíveis, a resistência, durabilidade e permeabilidade da pasta de cimento melhoraria substancialmente, reduzindo desse modo a lixiviabilidade das matrizes de cimento.

Polímeros orgânicos têm sido usados para melhorar as propriedades do cimento. Neste caso, DANIALI (1990) empregou o latex, uma emulsão acrílica de polímero, que apresenta grande potencialidade se usado com o cimento Portland na solidificação de resíduos perigosos.

Durante a hidratação da pasta de cimento misturada com latex, este, forma membranas filiformes sobre toda matriz. Essas membranas fortalecem o aprisionamento das partículas do resíduo dentro da pasta.

Foram preparados vários conjuntos de amostras com diferentes razões água/cimento, latex/cimento e poluente/cimento. Soluções aquosas de nitrato de Pb e Cr foram empregados como substâncias poluentes, sendo misturadas com água e latex e em seguida com cimento.

Os resultados dos testes de durabilidade realizados em amostras com poluentes inorgânicos foram muito bons. O teste de compressão de amostras contendo Pb e Cr não indicou perda de resistência devido a presença desses materiais. Concluindo, os resultados preliminares dos testes físicos e de lixiviação das matrizes

de cimento Portland misturado com latex, indicaram considerável melhora de comportamento em relação as matrizes de referência (cimento + elementos tóxicos).

3.6.8- Estudo da aplicação da areia de fundição de descarte em peças de cimento

MAZARIEGOS (1995), em pesquisa junto ao Departamento de Arquitetura da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, estudou a possibilidade da reutilização dos resíduos gerados no processo de fundição da SICOM⁵ - areias de fundição de descarte, como agregado para confecção de tijolos maciços. O acompanhamento e os resultados dos ensaios compreendidos por este estudo, foram de enorme contribuição para o enriquecimento da atual pesquisa.

Foram manipuladas misturas de cimento-resíduo em laboratório, para a determinação das composições com viabilidade técnica para a confecção dos tijolos maciços. Com base nos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e absorção de água das argamassas obtidas, decidiu-se utilizar na confecção dos tijolos, composições correspondentes aos seguintes traços: 1:3, 1:4, 1:6 e 1:7.

O processo de fabricação destes elementos utilizou a técnica de prensagem da argamassa dentro dos moldes. Previamente, foi necessário a determinação da umidade ótima de compactação das composições cimento-resíduo. Este parâmetro indica a relação água/materiais secos com a qual a argamassa compactada atinge a maior densidade (massa específica) possível.

Seguindo os procedimentos recomendados pelo DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, este parâmetro foi determinado segundo o método de ensaio AET M13-71 - Ensaio de Compactação de Solos. Este método visa a determinação de parâmetros, cujas definições e convenções são relacionadas à seguir:

- curva de compactação - é a curva que se obtém de acordo com o tipo de compactação adotado e representa em gráfico cartesiano: os teores de umidade em abscissas e as correspondentes densidades secas em ordenadas;
- densidade seca (Y_s) - é a densidade obtida considerando o volume aparente do solo úmido compactado e a massa de solo seco contido nesse volume.

⁵ SICOM LTDA- Sociedade Intercontinental de Compressores Herméticos/ atual TECUMSEH DO BRASIL LTDA.

- densidade úmida (Y_h) - é a densidade obtida considerando o volume aparente de solo úmido compactado e a massa de solo úmido contido nesse volume.
- densidade seca máxima (Y_{sm}) - é a densidade seca de maior valor obtido da respectiva curva de compactação.
- umidade ótima (H_o) - é o teor de umidade de compactação correspondente à densidade seca máxima.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, sendo utilizados três traços de cimento e resíduo: 1:3; 1:5 e 1:7. Os resultados são apresentados nas tabelas e gráficos seguintes.

TABELA 3.3- Ensaio de compactação da mistura cimento-resíduo (traço 1:3)

densidade úmida (Y_h) (g/cm^3)	densidade seca (Y_s) (g/cm^3)	umidade (H) (%)
2,05	1,85	10,61
2,09	1,87	11,86
2,11	1,88	12,84
2,10	1,84	13,73
2,16	1,80	14,83

$$Y_{sm} = 1,88 \text{ g/cm}^3$$

$$H_o = 12,84 \%$$

TABELA 3.4- Ensaio de compactação da mistura cimento-resíduo (traço 1:5)

densidade úmida (Y_h) (g/cm^3)	densidade seca (Y_s) (g/cm^3)	umidade (H) (%)
1,96	1,80	9,05
2,04	1,85	10,20
2,06	1,86	11,41
2,03	1,81	12,20
1,99	1,76	13,61

$$Y_{sm} = 1,86 \text{ g/cm}^3$$

$$H_o = 11,41 \%$$

TABELA 3.5- Ensaio de compactação da mistura cimento-resíduo (traço 1:7)

densidade úmida (Yh) (g/cm ³)	densidade seca (Ys) (g/cm ³)	umidade (H) (%)
1,90	1,76	7,91
1,97	1,80	9,55
2,03	1,83	11,14
2,07	1,84	12,22
2,08	1,83	13,51
2,02	1,76	15,19

$Y_{sm} = 1,84 \text{ g/cm}^3$

$H_o = 12,22 \%$

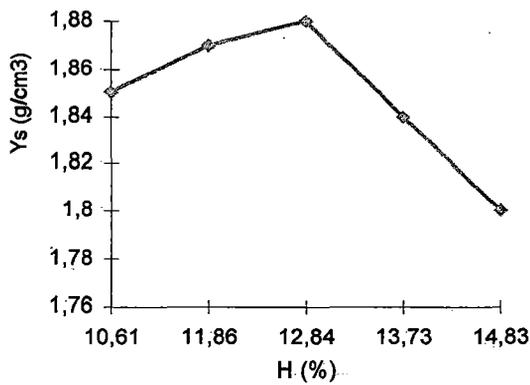


FIGURA 3.1- Curva de compactação da composição cimento-resíduo 1:3

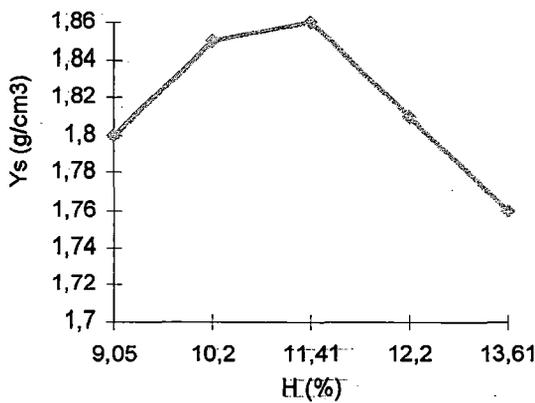


FIGURA 3.2- Curva de compactação da composição cimento-resíduo 1:5

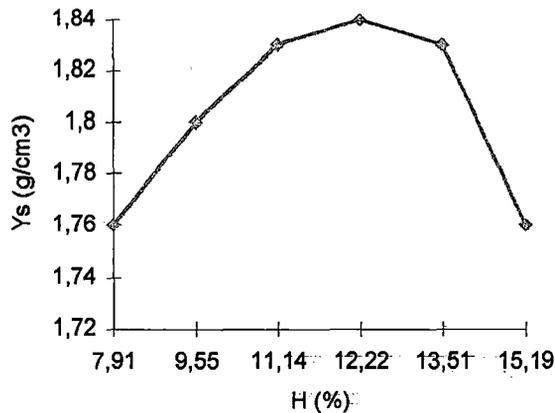


FIGURA 3.3- Curva de compactação da composição cimento-resíduo 1:7

Conforme observado, as argamassas de cimento Portland compostas com o resíduo, possuem uma densidade seca máxima praticamente constante e em média vale $1,86 \text{ g/cm}^3$. O mesmo acontece com a densidade úmida que apresentou valores sempre próximos de $2,00 \text{ g/cm}^3$. A umidade ótima de compactação manteve uma pequena faixa de variação, ou seja, de 11,41% a 12,84%. Desta forma, o teor água/materiais secos foi fixado em 12% para todos os traços.

A confecção dos tijolos empregou um processo de mistura manual, utilizando uma “colher de pedreiro”. Primeiro foram misturados os materiais secos, ou seja, o resíduo com o cimento, para depois acrescentar água, quando então foi efetuada a mistura final, até total homogeneização da argamassa.

Completa a mistura, verificou-se que as argamassas produzidas com teor água/materiais secos igual a 12%, possuíam uma consistência bastante seca e de difícil avaliação quantitativa através do abatimento do tronco de cone, sendo denominadas “argamassas secas”.

Para a confecção dos tijolos maciços, foi utilizada uma prensa manual e as dimensões finais foram calibradas em $23 \times 11 \times 5 \text{ cm}$ para comprimento, largura e altura, respectivamente.

Foram confeccionados 5 tijolos para cada traço, sendo que destes, 3 foram destinados ao ensaio de resistência à compressão e 2 para o ensaio de absorção de água. O processo de cura se deu em uma câmara úmida e os ensaios foram realizados com 28 dias de idade. Os procedimentos de preparação dos tijolos e execução dos

ensaios foram estabelecidos pelo método MB-1960 da ABNT (MAZARIEGOS, 1995).

- Propriedades físicas e mecânicas dos tijolos maciços

Os resultados relacionados na Tabela 6 correspondem à média dos valores obtidos nos ensaios de resistência mecânica e de absorção de água para. O Gráfico 4 mostra o limite mínimo de resistência à compressão e o Gráfico 5 o limite máximo do índice de absorção de água, ambos estabelecidos pela EB-1481 da ABNT para tijolos maciços de solo-cimento (MAZARIEGOS, 1995).

TABELA 3.6- Resistência à compressão e absorção de água de tijolos maciços empregando areia de fundição de descarte

traço (massa)	resistência à compressão (MPa)	absorção de água (%)
1:3	12,7	12,8
1:4	6,5	15,6
1:5	4,7	16,7
1:6	3,9	17,5
1:7	1,9	18,8

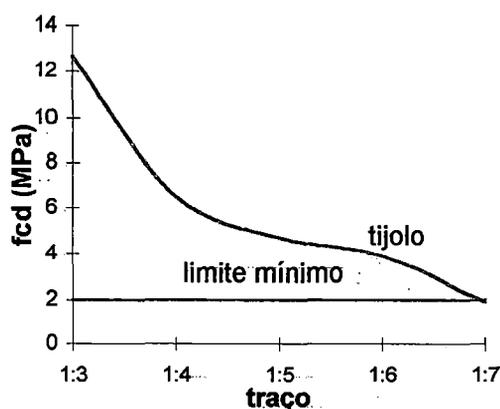


FIGURA 3.4- Resistência à compressão de tijolos maciços empregando areia de fundição de descarte

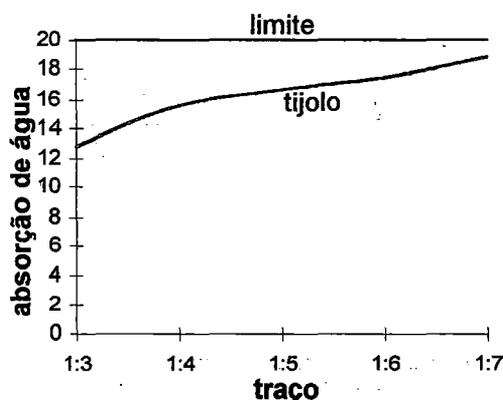


FIGURA 3.5- Absorção de água de tijolos maciços empregando areia de fundição de descarte

“De todos os traços empregados para a confecção dos tijolos maciços, somente o traço 1:7 apresentou resistência à compressão abaixo do limite mínimo estabelecido pela especificação adotada. Já os resultados obtidos quanto à absorção de água, estiveram satisfatórios para todos os traços investigados. Cabe aqui salientar, que os tijolos confeccionados com argamassas nos traços 1:6 e 1:7, apresentaram uma segregação da superfície por lixiviação durante o ensaio de absorção de água, dando uma indicação de baixo desempenho do tijolo ao longo do tempo. No entanto, os traços 1:3, 1:4 e 1:5 não apresentaram segregação dos tijolos” (MAZARIEGOS, 1995, p.46).

Finalizando seu estudo, MAZARIEGOS (1995) apresentou a seguinte conclusão: “os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e absorção de água dos tijolos maciços, demonstraram a total viabilidade técnica em utilizar-se o resíduo na composição de argamassas secas de cimento Portland, visando a confecção dos mesmos através da técnica de prensagem manual. Mesmo as composições que apresentaram segregação na superfície dos tijolos durante a execução do ensaio de absorção de água, podem ser utilizadas, desde que haja um revestimento adequado das alvenarias”.

3.6.9- Agregados de concreto reciclado e de resíduos de rejeitos urbanos

Entulho de construções de concreto fornece fragmentos nos quais o agregado está contaminado por pasta endurecida de cimento, gipsita e outras substâncias em menor quantidade. A fração que corresponde a agregado miúdo contém,

principalmente, pasta endurecida de cimento e gipsita e é inadequada para a produção de concreto. Entretanto, a fração que corresponde a agregado graúdo, embora coberta de pasta de cimento, tem sido usada com sucesso em vários estudos de laboratório e de campo. Uma revisão de vários estudos (MEHTA & MONTEIRO, 1994), indica que, comparado ao concreto com agregado natural, o concreto do agregado reciclado teria no mínimo dois terços da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, bem como trabalhabilidade e durabilidade satisfatórias.

“O principal obstáculo no uso do entulho de construção como agregado para concreto é o custo de britagem, graduação, controle de pó e separação dos constituintes indesejáveis. Concreto reciclado ou concreto de entulho britado pode ser uma fonte economicamente viável de agregados, em locais onde agregados de boa qualidade são escassos e quando o custo de disposição do entulho é incluído na análise econômica. Com base no maior trabalho, já realizado, de reciclagem de pavimento de concreto, o “Michigan State Department of Transportation”, de Michigan/USA, publicou que o entulho reciclado pela britagem do pavimento existente foi mais barato do que usar, inteiramente, material novo.” (MEHTA & MONTEIRO, 1994, p.252).

PINTO (1986), realizou estudos sobre a reutilização dos resíduos de construção na produção de argamassas, explorando-se o potencial pozolânico apresentado pelos resíduos cerâmicos, em traços diferenciados de argamassa para assentamento e revestimento de alvenaria.

Foram coletadas 33 amostras, no total de 3783 Kg de material. Após seleção manual, todo material foi passado por uma série de peneiras para detecção das faixas granulométricas em que os componentes comparecem. Em seguida, as amostras foram levadas para moagem. Os traços (em volume) utilizados foram: **1:1:6**, **1:2:12**, **1:2:18** e **1:2:24**.

Com relação ao custo dos resíduos, verificou-se o menor dispêndio com frete e menor custo por metro cúbico, quando comparado com a areia retirada de jazidas.

Concluiu-se que: “em resumo, os resíduos de construção além de potencialmente apresentarem bom comportamento em suas características de absorção e aderência, apresentaram como maior vantagem, além do custo de recuperação do material, significativas diferenças na resistência à compressão”.

Investigações também têm sido feitas para avaliar rejeitos urbanos e resíduos de incineração como uma possível fonte de agregados para concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Vidro, papel, metais e materiais orgânicos são os principais constituintes dos rejeitos urbanos.

A presença de vidro triturado no agregado tende a produzir misturas de concreto pouco trabalháveis e, devido ao alto teor de álcalis, afeta a sua resistência e durabilidade a longo prazo. Metais como alumínio reagem com soluções alcalinas e causam expansão excessiva. Papel e rejeitos orgânicos, com ou sem incineração, causam problemas de pega e endurecimento no concreto de cimento Portland. Em geral, portanto, rejeitos urbanos não são adequados para produzir agregados para uso em concreto estrutural⁶. Alguns trabalhos, contudo, têm indicado a possibilidade de emprego em argamassas de assentamento e revestimento⁷.

⁶ No Brasil, as pesquisas com resultados satisfatórios são relativas à sinterização de lodo de esgoto urbano para a produção de agregados leves para concreto, como inicialmente feito em São Paulo, pelo IPT, e depois em Londrina, por MORALES, G. *Caracterização do agregado leve obtido a partir do lodo de esgoto da cidade de Londrina*. São Paulo, EPUSP, 1989.

⁷ SILVA, L. F. (USP. Escola de Engenharia de São Carlos). *Comunicação pessoal*, 1996.

4- ENCAPSULAMENTO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM MATRIZ DE CIMENTO - DESCRIÇÃO DA NATUREZA DO RESÍDUO

4.1- FONTE GERADORA

O resíduo objeto desta pesquisa é proveniente do setor de fundição da TECUMSEH DO BRASIL LTDA (antiga SICOM), indústria localizada em São Carlos-SP. Destinado à obtenção de algumas peças metálicas empregadas no processo de fabricação de seus produtos, o setor de fundição da empresa atinge uma produção de aproximadamente 1100 toneladas de peças metálicas de ferro cinzento por mês, gerando cerca de 250 toneladas de resíduo sólido pela desmoldagem dos moldes de areia.

A areia-base utilizada na composição das areias de fundição é do tipo silicosa, encontrada em jazidas nas proximidades de São Carlos. A TECUMSEH consome cerca de 300 toneladas por mês dessa areia.

A argila utilizada como aglomerante é a bentonita sódica ativada, fornecida principalmente pela Bentonit União Nordest S.A., e apresenta a seguinte composição:

TABELA 4.1- Análise química da areia de moldagem

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 Nordest S.A. (1992).

Para melhorar algumas características e propriedades dos moldes, é utilizado carvão mineral em pó em pequenas proporções, como aditivo na composição das areias de fundição.

Ensaio realizados pela empresa para controle da qualidade dos moldes, indicam que as areias de fundição empregadas possuem a seguinte composição:

TABELA 4.2- Composição básica da areia de fundição empregada na TECUMSEH

Componente	Proporção em massa (%)
areia silicosa	83 a 89
bentonita	8 a 13
carvão mineral	0,6 a 1
água	3

fonte: SICOM (Soc. Intercont. de Compressores Herméticos Ltda)⁸.

4.1.1- O processo industrial

O fluxograma anexado, ilustra simplificada o processo de produção das peças metálicas utilizado pelo setor de fundição da TECUMSEH, além de indicar os pontos de descarte de resíduos.

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. Nesse nível a areia base não se funde, mantendo a estrutura granular cristalizada, enquanto que grande parte da argila perde sua característica aglomerante, transformando-se em material pulverulento inerte e o carvão mineral se mantém na sua forma de material carbonoso.

Um fato importante do ponto de vista de interesse da pesquisa, é que a solidificação do metal envolve liberação de gases, os quais passando através do molde, carregam consigo pedaços pequenos do metal utilizado, que solidificam-se dentro do molde e farão parte constituinte das areias de fundição de descarte.

Observe-se que apenas parte da areia de fundição transforma-se em resíduo. Na TECUMSEH as areias são reaproveitadas após passarem por um processo de

⁸ SICOM LTDA. Preparação de areia de fundição /folha de processos, São Carlos, 1992/

recuperação e regeneração, que consiste no seu resfriamento e peneiramento seguido de adição de areia nova, bentonita, carvão mineral e água.

As areias de fundição descartadas são provenientes de pedaços de moldes que se desagregam durante o trajeto e caem ao chão, assim como do esvaziamento parcial do silo destinado ao armazenamento das areias usadas, quando excessivamente cheio (FIGURA 4.1).

Os resíduos são então estocados ao ar livre em um pátio da empresa, para depois serem transportados e dispostos em um aterro industrial.

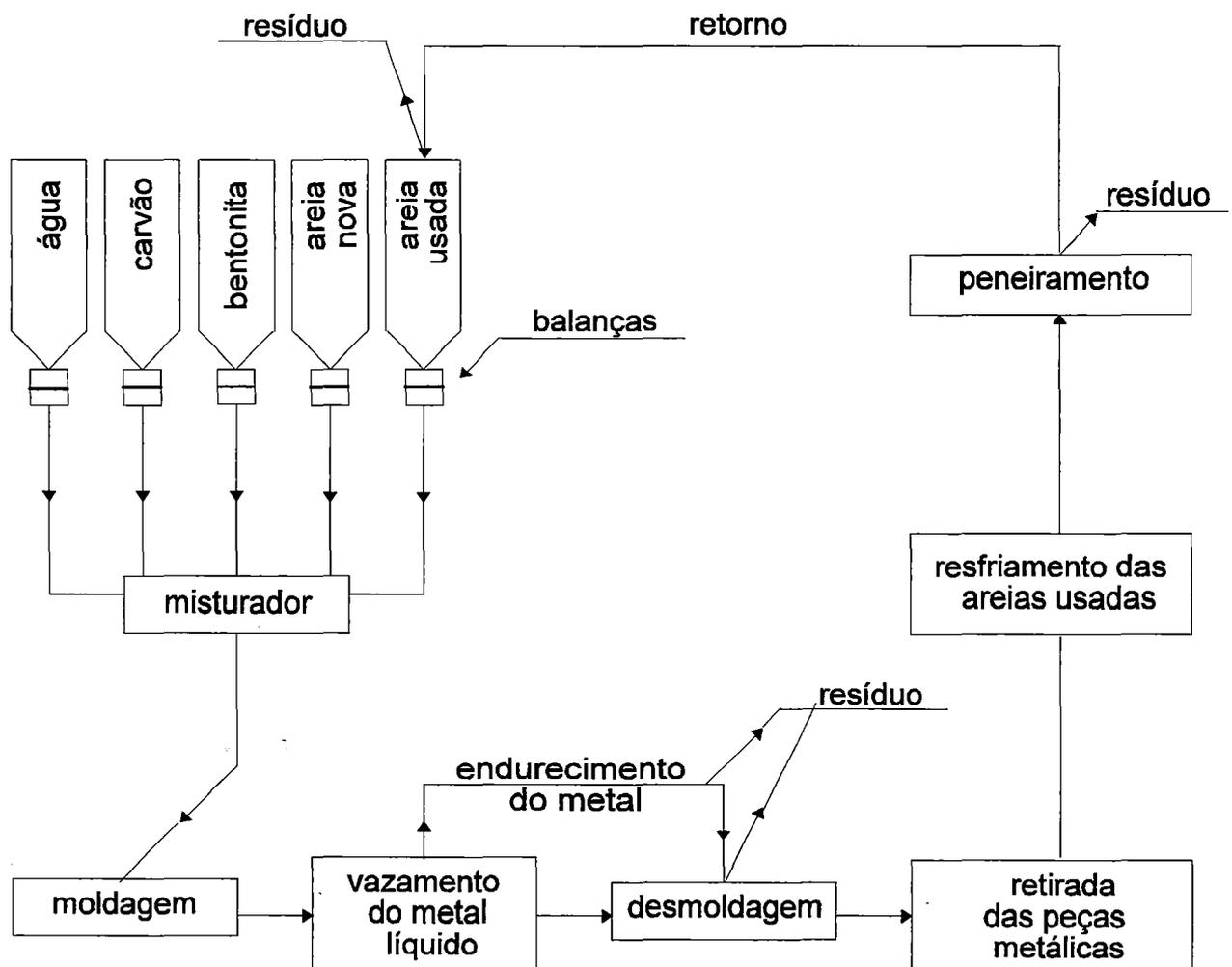


FIGURA 4.1- Fluxograma simplificado do processo de fundição

5- ENCAPSULAMENTO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM MATRIZ DE CIMENTO - DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Durante o período de abril de 1995 a setembro de 1996 foram desenvolvidos no Laboratório de Saneamento e Laboratório de Construção Civil da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, uma sequência de experimentos visando fornecer um quadro das principais características técnicas do processo de encapsulamento de areia de fundição com cimento, possibilitando uma análise do comportamento dos materiais ensaiados, indicando tendências e, principalmente, apontando caminhos para novos experimentos do gênero.

O encapsulamento de resíduos tóxicos, técnica muito pouco difundida e pesquisada no Brasil, ainda não dispõe de normas e procedimentos padronizados que regulamentem as pesquisas sobre o assunto. Diante disso, procurou-se em todas as etapas da pesquisa, utilizar e adaptar métodos de ensaios padronizados para outros materiais.

Em virtude da diversidade de ensaios e principalmente, pela ausência de informações prévias mais específicas do material, julgou-se necessário executar a parte experimental da pesquisa em duas etapas:

- Ensaio Preliminares
- Metodologia da Fase Experimental

5.1- ENSAIOS PRELIMINARES

Os ensaios ditos preliminares, caracterizam uma importante etapa da pesquisa, visto que compreendem o reconhecimento inicial dos materiais e métodos a serem empregados, servindo assim, como suporte para o estabelecimento de critérios e procedimentos adotados na fase experimental da pesquisa.

5.1.1- Caracterização do Resíduo Pesquisado

Para o levantamento das características físico-químicas do resíduo e sua classificação, foram empregados os procedimentos de amostragem e execução dos ensaios recomendados pelas especificações da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Este primeiro “contato” com o resíduo, proporcionou: um reconhecimento das suas características de manuseio e composição, identificação dos íons metálicos presentes, estabelecimento do grau de periculosidade do resíduo, entre outras características.

Em todos os procedimentos realizados com a presença do resíduo, exceto nos relativos à sua classificação como resíduo sólido, o mesmo foi previamente seco ao ar e peneirado (item 5.5.1).

5.1.1.1- Análise quantitativa do resíduo bruto

As concentrações de metais presentes no resíduo bruto foram previamente determinadas através dos ensaios de Lixiviação e Solubilização, segundo procedimentos estabelecidos pela NBR 10005 (1987) e NBR 10006 (1987).

Os resultados obtidos serviram de referência para verificação da eficiência do processo de encapsulamento, determinada através da comparação das concentrações de metais pesados do resíduo bruto, com as concentrações dos mesmos metais das matrizes encapsuladas.

A identificação dos metais das amostras do extrato lixiviado e solubilizado foi realizada no Laboratório de Saneamento da EESC, com exceção do alumínio, identificado no Laboratório de Química Analítica da Universidade Federal de São Carlos.

5.1.1.2- Caracterização do resíduo como agregado para a utilização na composição de argamassas de cimento Portland

Na presente investigação adotou-se a técnica de encapsulamento através da adição de cimento e água, fazendo com que o resíduo passasse a desempenhar o papel de agregado na composição de argamassas de cimento Portland.

Além de desempenhar uma função econômica de máxima importância, pois geralmente é o elemento de custo mais baixo por unidade de volume na argamassa e no concreto, o agregado atua de forma decisiva no incremento de certas propriedades dos mesmos, como: resistência, estabilidade dimensional e durabilidade (BAUER, 1985). Diante disto, fica estabelecida a importância do conhecimento do comportamento do resíduo como agregado e sua influência no desempenho das argamassas de cimento com ele compostas.

A qualidade dos agregados utilizados na obtenção de argamassas de cimento Portland, pode ser avaliada através de alguns índices e características da sua composição, como: quantidade de substâncias nocivas (materiais carbonosos, materiais pulverulentos, torrões de argila), quantidade de impurezas orgânicas, granulometria, massa específica e outros (BAUER, 1985).

A caracterização do resíduo como agregado foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ABNT, sendo todos os ensaios envolvidos realizados no Laboratório de Construção Civil da EESC.

Não seria possível dentro do âmbito desta pesquisa pretender esgotar o assunto, já que a idéia principal é assumir a areia de fundição como resíduo tóxico de importância no controle ambiental e em segundo plano, assumi-la como agregado na composição de argamassas de cimento.

Aos pesquisadores que irão militar no ramo da tecnologia de reutilização de resíduos como material de construção, alertamos que esta investigação deverá ser considerada apenas como elemento inicial de um estudo que deverá envolver considerações muito mais abrangentes.

- Análise granulométrica

Composição granulométrica é a distribuição das partículas dos materiais granulares entre várias dimensões, e é usualmente expressa em termos de porcentagens acumuladas maiores ou menores do que cada uma das aberturas de uma série de peneiras, ou de porcentagens entre certos intervalos de abertura das peneiras (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

A dimensão máxima do agregado é, convencionalmente, designada pela dimensão da abertura da peneira na qual ficam retidos 15% ou menos das partículas do agregado (MEHTA & MONTEIRO, 1994)⁹.

Quanto às dimensões dos grãos, as areias são classificadas como agregados miúdos, ou seja, possuem dimensão máxima característica igual ou inferior a 4,8 mm (NBR 7211, 1983).

Há várias razões para a especificação de limites granulométricos e da dimensão máxima dos agregados, a mais importante é a sua influência na trabalhabilidade e custo da argamassa (BAUER, 1985).

Na prática, um parâmetro empírico chamado módulo de finura é muitas vezes usado como um índice de finura do agregado. O módulo de finura é calculado com os dados da análise granulométrica, pela soma das porcentagens retidas acumuladas do agregado em cada uma das peneiras de uma série especificada, sendo a soma dividida por 100. De acordo com os limites estabelecidos para o módulo de finura (M.F.), as areias são classificadas em finas, médias e grossas (TABELA 5.1).

A especificação da NBR 7211 (1983) também classifica as areias, quanto à composição granulométrica, através da determinação de zonas delimitadas por valores percentuais de retenções acumuladas (TABELA 5.2).

TABELA 5.1- Classificação das areias de acordo com o módulo de finura

areia	M.F.
fina	$M.F. \leq 2,40$
média	$2,40 < M.F. < 3,90$
grossa	$M.F. \geq 3,90$

⁹ No Brasil, a dimensão máxima característica é a abertura nominal da peneira, em mm, na qual fica retida acumulada uma porcentagem igual ou imediatamente inferior a 5% da massa do agregado, conforme a norma "ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Terminologia. NBR 9935. TB-309. Rio de Janeiro, ABNT, 1987".

TABELA 5.2- Classificação das areias de acordo com as zonas de retenção acumuladas

zona de retenção	classificação da areia
zona 1	areia muito fina
zona 2	areia fina
zona 3	areia média
zona 4	areia grossa

Os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 7217 (1987), Agregados - Determinação da composição granulométrica. Através dos resultados obtidos no peneiramento de duas amostras, foram determinados o módulo de finura, a dimensão máxima característica e sua classificação por zona de porcentagem de retenção acumulada.

- Substâncias deletérias

Substâncias deletérias são aquelas que estão presentes como constituintes no agregado e que são capazes de prejudicar a trabalhabilidade, a pega e o endurecimento, e as características de durabilidade da argamassa. Na TABELA 5.3, é apresentada uma lista de substâncias nocivas e seus possíveis efeitos nas argamassas e concretos (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

TABELA 5.3- Substâncias deletérias nos agregados

substância	efeitos deletérios possíveis nas argamassas e concretos
material pulverulento	afeta trabalhabilidade; aumenta consumo de água
torrões de argila e partículas friáveis	afeta trabalhabilidade e a resistência à abrasão
impurezas orgânicas e metais (Pb, Zn)	problemas de pega e endurecimento

O termo materiais pulverulentos designa todas as partículas minerais com dimensão inferior a 0,075 mm, inclusive os materiais solúveis em água, segundo a NBR 9935 (1987), Agregados - Terminologia. Quando presentes em grandes

quantidades nos agregados para a utilização em argamassas, podem prejudicar seu total envolvimento por parte da pasta de cimento, transformando-se em regiões frágeis e de fácil segregação após o endurecimento, afetando a trabalhabilidade. Para a utilização em concretos, as especificações brasileiras estabelecem a presença de um teor máximo de 5% de material pulverulento em relação à massa total de agregados miúdos. O ensaio para a determinação do teor de material pulverulento presente no resíduo foi realizado de acordo com a NBR 7219 (1987) da ABNT.

Por torrões de argila e partículas friáveis, entenda-se as partículas presentes nos agregados suscetíveis de serem desfeitas pela pressão entre os dedos polegar e indicador, segundo a NBR 9935 (1987), Agregados - Terminologia. A composição da areia de fundição e o seu manuseio tornam evidente a identificação desses elementos

Recentemente, casos de falha na pega do concreto foram relatados, na produção de dois blocos de fundação em usinas do sul da Irlanda. O problema foi atribuído à presença de quantidades significativas de chumbo (Pb) e zinco (Zn) (a maior parte na forma de sulfetos), no agregado calcítico. Aqueles blocos que tiveram problema de pega, continham 0,11% ou mais de composto de Pb ou 0,15% ou mais de composto de Zn, em massa do concreto. Sais solúveis de Pb ou Zn são retardadores da hidratação do cimento Portland, de tal potência, que concretos experimentais feitos com amostras do agregado contaminado não desenvolveram qualquer resistência após 3 dias de cura (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

A identificação da influência da presença de alguns metais pesados na cura e hidratação de argamassas e concretos de cimento, acentua a necessidade desta pesquisa envolver um reconhecimento da possível influência dos compostos da areia de fundição de descarte no comportamento das argamassas produzidas.

Deve-se observar que problemas de pega e endurecimento da argamassa e do concreto também podem ser causados pela presença de matéria orgânica no agregado. 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 - A.P.H.A. (1992).

- Massa específica e massa unitária

Para efeito de dosagem da argamassa, é importante conhecer o volume ocupado pelas partículas do agregado, incluindo os poros existentes dentro das partículas. Portanto, é suficiente a determinação da massa específica, que é definida como a massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos das partículas.

Foi empregado o método de ensaio da NBR 9776 (1987), que estabelece os procedimentos para a determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.

Além da massa específica, outra informação usualmente necessária para a dosagem de concretos e argamassas, é a massa unitária, que é definida como a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume. O fenômeno da massa unitária surge, porque não é possível empacotar as partículas dos agregados juntas, de tal forma que não haja espaços vazios¹⁰. O termo massa unitária é assim relativo ao volume ocupado por ambos: agregados e vazios.

O ensaio para a determinação da massa unitária do resíduo no estado solto foi realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 7251 (1982) da ABNT.

- Teor de umidade

Como já mencionado, o resíduo utilizado nos ensaios foi previamente seco ao ar, apresentando portanto, um teor de umidade ainda retido em sua massa. A importância desta determinação está em poder corrigir a quantidade de água estabelecida para a composição de misturas.

5.1.1.3- Determinação inicial das proporções cimento:resíduo das misturas

O proporcionamento dos materiais da argamassa, também conhecido por dosagem da argamassa, é um processo através do qual é obtida a melhor proporção

¹⁰ No Brasil, onde ainda é corrente a dosagem de concretos em volume nos canteiros de obra, a massa unitária dos agregados é uma informação indispensável para a conversão dos traços de concreto em massa para volume (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

entre cimento, agregado e água para produzir uma argamassa que atenda a certas especificações prévias. Embora a dosagem dos concretos seja governada por sólidos princípios técnicos, pode-se dizer, por várias razões plausíveis, que este processo é considerado mais uma arte do que uma ciência (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Apesar de muitos engenheiros não ficarem à vontade no trato de matérias que não possam ser transformadas num conjunto exato de números, com o entendimento dos princípios básicos e com alguma prática, a arte de proporcionamento das misturas de concretos e argamassas pode ser dominada.

Um dos propósitos da dosagem, é obter um produto que tenha um desempenho que atenda a certos requisitos previamente estabelecidos, sendo a trabalhabilidade da argamassa no estado fresco e a resistência da argamassa endurecida a uma idade definida, os requisitos normalmente mais importantes.

Outro propósito do proporcionamento das argamassas é obter uma mistura que satisfaça os requisitos de desempenho ao mínimo custo possível.

Nesta pesquisa, particularmente, o objetivo amplo do proporcionamento das argamassas, pode ser resumido como: a definição de composições entre os materiais que comprovem a adequação da técnica de encapsulamento do resíduo, combinada à condição mais econômica possível, juntamente com a possibilidade de emprego do produto final.

Antes de se iniciar a moldagem dos corpos-de-provas que seriam utilizados para os ensaios tecnológicos da pesquisa, procurou-se manipular no laboratório misturas de resíduo e cimento. Estes estudos preliminares permitiram sentir a trabalhabilidade das misturas, aspecto que poderia fornecer subsídios adicionais para a determinação das composições entre os materiais a serem ensaiados.

As proporções iniciais foram definidas tendo como referência apenas a experiência dos técnicos do Laboratório de Construção Civil, que forneceram uma primeira orientação à partir da determinação visual das características das misturas.

Na definição das composições procurou-se compreender desde um traço rico em cimento, até um traço pobre. Desta forma, como uma primeira orientação para este estudo, adotou-se os seguintes traços cimento-resíduo: 1:1, 1:3, 1:5 e 1:8.

5.1.1.4- Resistência à compressão dos ensaios preliminares

Além das condições de trabalhabilidade das misturas manipuladas no laboratório, outro parâmetro de singular importância para a caracterização das propriedades das argamassas de cimento Portland compostas com o resíduo, é o valor da resistência à compressão dos corpos-de-provas confeccionados, que foi definido de acordo com a NBR 5739 (1994).

A resistência de um material é definida como a capacidade deste resistir à tensão de ruptura .

5.1.1.5- Determinação das consistências das argamassas de cimento-resíduo

Consistência, de maneira ampla, é o grau de umidade da argamassa e representa sua facilidade de deformação. É normalmente avaliada em termos de abatimento do corpo-de-prova troncocônico (ou seja, quanto mais úmida a mistura, maior o abatimento), segundo NBR 7215 (1993).

Considerando que o índice de consistência da argamassa afeta a facilidade com que ela poderá fluir durante a moldagem e o ensaio é simples, o procedimento de dosagem tomou o espalhamento da argamassa como um índice de trabalhabilidade.

5.2- RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS PRELIMINARES

5.2.1- Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo bruto

TABELA 5.4- Lixiviação e solubilização da areia de fundição de descarte (resíduo bruto)

elemento	Lixiviação (mg/L)	Lixiviação L.M. ² (mg/L)	Solubilização (mg/L)	Solubilização L.M. (mg/L)
Al	3,10	-	3,69	0,2
Cd	nd ¹	0,5	nd	0,005
Cr	0,09	5,0	0,12	0,05
Cu	0,03	-	0,02	1,0
Fe	0,30	-	0,34	0,3
Mn	0,05	-	0,02	0,1
Ni	nd	-	nd	-
Pb	nd	5,0	nd	0,05
Zn	0,30	-	0,08	5,0

¹ nd, elemento não detectado

² L.M. - Limite Máximo permitido pela NBR 10004 (1987) da ABNT

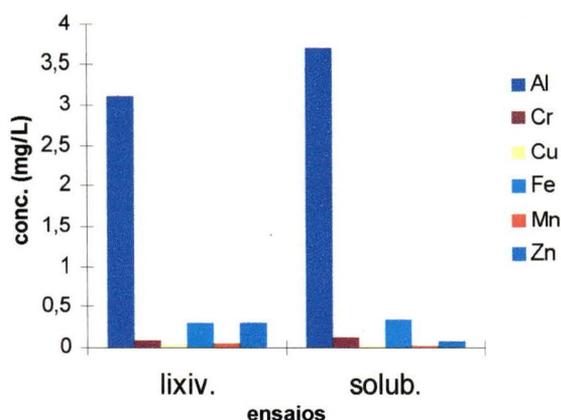


FIGURA 5.1- Caracterização da areia de fundição de descarte

Parâmetros que estão em desacordo (NBR 10004, 1987) segundo teste de Solubilização:

Al - 3,69 mg/L

Cr - 0,12 mg/L

Fe - 0,34 mg/L

Classificação do resíduo (NBR 10004,1987):

classe II- não perigoso, não inerte

5.2.2- Resultados dos ensaios de granulometria do resíduo

TABELA 5.5- Composição granulométrica do resíduo (amostra 1)

peneira (mm)	massa da amostra (g)	1200 g		
		massa retida (g)	% em massa	
			individual	acumulada
4,8	-	-	-	
2,4	4,2	0,4	0,4	
1,2	40,7	3,4	3,8	
0,6	49,2	4,1	7,9	
0,3	543,4	45,4	53,3	
0,15	529,2	44,2	97,5	
< 0,15	30,3	2,5	100	
total	1197	mód. de finura	1,63	
dimensão máxima	1,2 mm			

TABELA 5.6- Composição granulométrica do resíduo (amostra 2)

peneira (mm)	massa da amostra (g)	1000 g		
		massa retida (g)	% em massa	
			individual	acumulada
4,8	-	-	-	
2,4	4,7	0,5	0,5	
1,2	22,2	2,2	2,7	
0,6	40,0	4,0	6,7	
0,3	440,9	44,1	50,8	
0,15	460,7	46,1	96,9	
< 0,15	31,1	3,1	100	
total	999,6	mód. de finura	1,58	
dimensão máxima	1,2 mm			

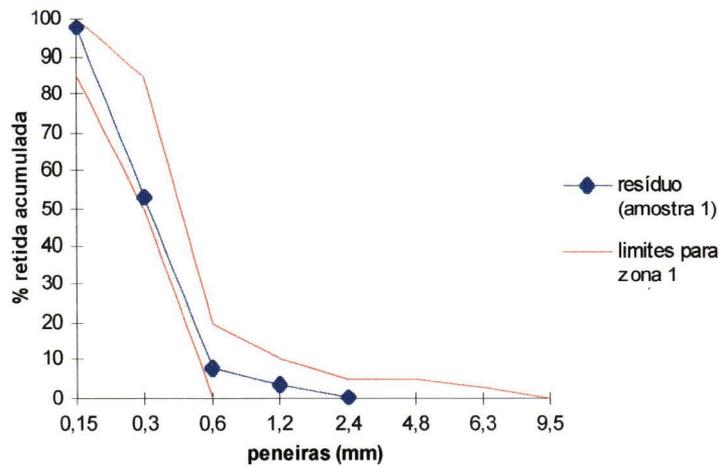


FIGURA 5.2- Curva granulométrica da areia de fundição de descarte com os limites para zona 1 (amostra 1)

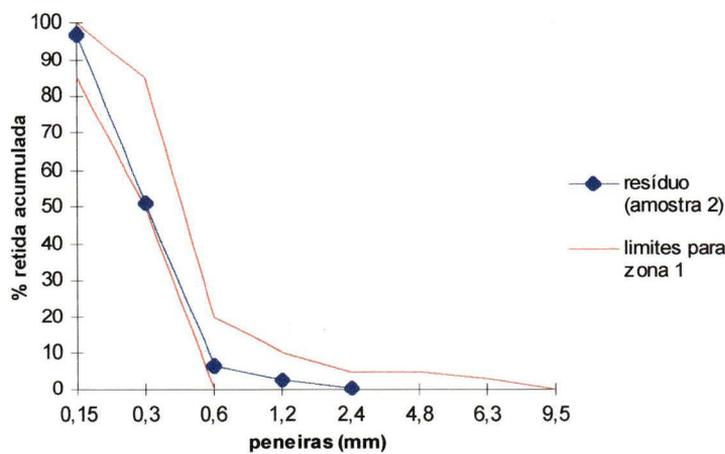


FIGURA 5.3- Curva granulométrica da areia de fundição de descarte com os limites para zona 1 (amostra 2)

Como todos os grãos componentes do resíduo passaram pela peneira de abertura 4,8 mm, ele é considerado um agregado miúdo, o módulo de finura obtido caracteriza o resíduo como um agregado miúdo fino, e, como foi possível constatar pela composição granulométrica, a grande porcentagem de massa dos grãos que compõem o resíduo ficou retida nas peneiras de abertura de malha 0,3 e 0,15 mm, e uma pequena nas demais peneiras com maior abertura, o que faz com que o resíduo seja classificado, através das zonas de porcentagem de retenção acumuladas, como um agregado miúdo muito fino.

5.2.3- Resultados da análise de teor de materiais pulverulentos

TABELA 5.7- Teor de materiais pulverulentos do resíduo

amostra	teor de material pulverulento (%)
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 composições de concretos estruturais.

5.2.4- Resultados do ensaio de sólidos totais

P_0 = peso da cápsula

P_1 = peso cápsula + resíduo

P_2 = P_1 seco a 103°C

P_3 = P_2 calcinado a 600°C

P_0 = 103,80g

P_1 = 153,80g

P_2 = 152,43g

P_3 = 151,76g

peso úmido (P_{seco}) = $P_1 - P_0$	$P_{\text{úmido}} = 50,00\text{g}$
peso seco ($P_{\text{úmido}}$) = $P_2 - P_0$	$P_{\text{seco}} = 48,63\text{g}$
% 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) = $T - F$	STV = 0,67g
% de sólidos totais fixos = $STF/ST \times 100$	% STF = 98,62%
% de sólidos totais voláteis = $1 - STF/ST \times 100$	% STV = 1,38%

A porcentagem de sólidos totais voláteis indica que o teor de matéria orgânica no resíduo é muito baixo. Diante desse resultado, esta pesquisa não se atentou à investigação da possibilidade da influência da matéria orgânica nas argamassas de cimento e resíduo.

5.2.5- Massa específica e massa unitária

TABELA 5.8- Massa específica do resíduo

amostra	massa específica (g/cm^3)
1	2,63
2	2,64
3	2,62
média	2,63

Tabela 5.9- Massa unitária do resíduo no estado solto

amostra	massa unitária (kg/dm^3)
1	1,16
2	1,16
3	1,17
média	1,16

5.2.6- Teor de umidade

TABELA 5.10- Teor de umidade do resíduo seco ao ar

amostra	teor de umidade (%)
1	2,16
2	2,08
3	2,11
média	2,17

5.2.7- Reconhecimento das condições de trabalhabilidade e resistência - definição dos traços cimento:resíduo

TABELA 5.11- Resistência à compressão das matrizes de cimento-resíduo (7 dias)

traços	massas (g)		vol. H ₂ O (ml)	u (%)	a/c	consistência (mm)	resistência (MPa)
	cim.	res.					
1:1	450	450	185	20,6	0,41	163	35,9
1:3	225	675	191	21,2	0,85	163	12,4
1:5	150	750	198	22	1,32	160	5,2
1:8	100	800	210	23,3	2,10	162	2,8

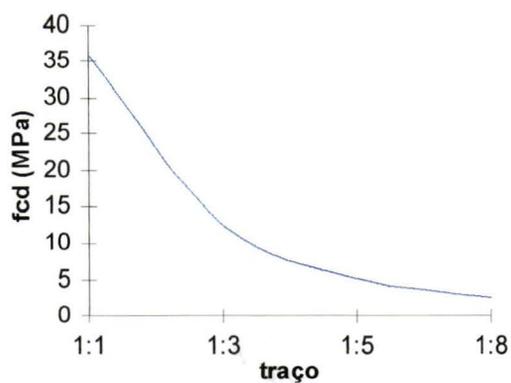


FIGURA 5.4- Resistência à compressão das matrizes de cimento-resíduo (7 dias)

Os resultados do ensaio de resistência dos corpos-de-prova aos 7 dias foi satisfatório, sendo seu decréscimo coerente à composição dos traços.

5.2.8- Verificação das condições de trabalhabilidade e resistência - influência da consistência da argamassa

TABELA 5.12- Variação da trabalhabilidade e resistência em função da consistência das misturas (traço 1:3)

massa res.(g)	massa cim(g)	água (ml)	teor umidade (u%)	a/c	consistência (mm)	resist. média (MPa)	observações
1200	400	320	20%	0,80	144	7,13	mistura muito seca, baixa homogeneização
1200	400	340	21,3%	0,85	148	7,97	boa trabalhabilidade
1200	400	360	22,5%	0,90	164	7,36	boa trabalhabilidade
1200	400	380	23,8%	0,95	183	7,15	boa condição de moldagem, mas fluidez poderia ser menor
1200	400	400	25%	1,00	203	6,47	fluidez muito elevada

TABELA 5.13- Variação da trabalhabilidade e resistência em função da consistência das misturas (traço 1:10)

massa res. (g)	massa cim. (g)	água (ml)	teor umidade (u%)	a/c	consistência (mm)	resist. média (MPa)	observações
1200	120	264	20%	2,20	139	1,76	mistura seca
1200	120	277,2	21%	2,31	145	1,95	boa trabalhabilidade
1200	120	290,4	22%	2,42	153	1,85	boa trabalhabilidade
1200	120	316,8	24%	2,64	171	1,63	muita fluidez

Os resultados da análise das várias misturas manipuladas em laboratório, demonstraram que a consistência é um parâmetro diretamente relacionado com as

características de trabalhabilidade e resistência final do material solidificado, podendo portanto ser fixado como referência para a composição das argamassas.

É necessário destacar que várias misturas experimentais em laboratório foram necessárias antes de chegar a uma trabalhabilidade satisfatória, ainda que esse julgamento pressuponha um noção apenas qualitativa. Ao iniciar a produção das argamassas, ajustes posteriores no volume de água podem ser necessários. Por isso é reconhecida a importância da experiência passada nos procedimentos de proporcionamento entre os materiais.

5.3- CONCLUSÕES DOS ENSAIOS PRELIMINARES

Os ensaios preliminares descritos no item anterior forneceram subsídios importantes para a elaboração da metodologia empregada na fase experimental da pesquisa. Os resultados destes ensaios, juntamente com as informações sobre outras pesquisas relatadas neste trabalho, permitiram estabelecer os seguintes critérios e procedimentos adotados na realização dos experimentos.

5.3.1- Proporções entre os materiais das misturas

As resistências iniciais (7 dias) indicaram um bom comportamento mesmo para os traços mais pobres em cimento. Desta forma, definiu-se que as misturas a serem ensaiadas teriam as proporções: **1:3, 1:5, 1:8 e 1:10**.

5.3.2- Preparação das misturas

Uma das observações mais significativas efetuadas nos ensaios preliminares, foi que misturas realizadas na mesma proporção, apresentaram resultados de consistência variáveis, em função da forma e do tempo de mistura, o que alertou para a necessidade de uma padronização do processo de moldagem em todos os ensaios da pesquisa, permitindo comparações mais confiáveis entre as diversas misturas (item 5.5.3).

5.3.3- Idade das matrizes ensaiadas

Foram estabelecidas as idades usuais para controle tecnológico do concreto: 7, 28 e 90 dias.

5.3.4- Consistência das misturas

A quantidade de água utilizada nas misturas, foi tal que mantivesse constante a consistência das argamassas para todas as composições. Estabeleceu-se essa consistência em 155 ± 10 mm, determinada de acordo com o procedimento estabelecido pela NBR 7215 (1993).

5.3.5- Ensaio realizados para determinação da eficiência do processo

Foi estabelecido que deveriam ser realizados no mínimo os Ensaio de Lixiviação, Solubilização e Resistência Mecânica para análise do comportamento tecnológico do processo. Como informação complementar, foram medidas as consistências de todas as argamassa ensaiadas.

5.3.6- Corpos-de-prova moldados

Para os ensaios de resistência à compressão foram moldados 6 corpos-de-prova cilíndricos de ϕ 5 cm x 10 cm, por traço.

Com relação ao ensaio de lixiviação e solubilização, foram moldados no mínimo 6 corpos-de-prova cilíndricos de ϕ 3,3 cm x 7,1 cm, destinando-se 2 para os ensaios de solubilização e 3 para lixiviação.

5.4- METODOLOGIA DA FASE EXPERIMENTAL

Os experimentos a serem descritos neste item foram executados de acordo com o seguinte roteiro:

- secagem e peneiramento da areia de fundição;

- preparo dos moldes;
- preparo das misturas;
- determinação das consistências das misturas;
- moldagem dos corpos-de-prova;
- cura dos corpos-de-prova;
- ensaio de resistência mecânica das misturas solidificadas;
- ensaio de lixiviação das misturas solidificadas;
- ensaio de solubilização das misturas solidificadas.
- difração de raios-X

À seguir, é descrita a metodologia empregada na realização de cada uma destas etapas.

5.4.1- Secagem e peneiramento da areia de fundição

A areia de fundição destinada aos experimentos foi retirada dos tambores de armazenamento da TECUMSEH e enviada ao local de disposição, Laboratório de Construção Civil, onde foi espalhada, devidamente homogeneizada e secada ao ar livre. Em seguida, foi peneirada em peneira de malha 4,8mm, para retenção dos pedaços maiores de metais. O resíduo peneirado foi estocado em tambores no laboratório (FIGURA 5.5).

5.4.2- Preparo dos moldes para moldagem dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova para os ensaios de resistência à compressão foram moldados em formas cilíndricas de ϕ 5cm x 10cm, usualmente empregadas nos ensaios de cimento. Para o ensaio de lixiviação e solubilização, foram moldados corpos-de-prova em formas cilíndricas de ϕ 3,3cm x 7,1cm, conforme padronização da NBR 10005 (1987). Estes moldes foram feitos de PVC e rosqueados em bandeja metálica (FIGURA 5.6).

A moldagem dos corpos-de-prova, foi precedida de um cuidadoso preparo das formas, baseado nas recomendações estabelecidas pela NBR 7215 (1993), Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.

Os moldes foram inicialmente limpos e então rosqueados. Antes de fechar a fenda do molde unta-se toda a extensão da fenda vertical, toda superfície interna e o fundo da fôrma com óleo desmoldante. Este procedimento foi suficiente para garantir que os corpos-de-prova destinados ao ensaio de resistência mecânica não fossem danificados durante a desmoldagem.

Os moldes dos corpos-de-prova destinados aos ensaios de lixiviação e solubilização não foram untados, para evitar alterações nos resultados finais destes ensaios, em virtude da possibilidade de interferência de substâncias oriundas do óleo desmoldante. Mesmo assim, as misturas realizadas com areia de fundição puderam ser facilmente desmoldadas.

5.4.3- Preparo das misturas

Para preparo das argamassas de cimento-resíduo foi estabelecido o procedimento de mistura mecânica recomendado pela NBR 7215 (1993) da ABNT. Inicialmente é colocada na cuba toda a quantidade de água e em seguida adicionado o cimento. A mistura desses materiais deve ser feita com o misturador na velocidade baixa durante 30s. Após este tempo e sem paralisar a operação de mistura, inicia-se a colocação da areia de fundição, com o cuidado de que toda esta areia seja colocada gradualmente durante o tempo de 30s. Imediatamente após o término da colocação do resíduo, muda-se para a velocidade alta, misturando-se os materiais nesta velocidade durante 30s. Após esse tempo, desliga-se o misturador durante 1min e 30s. Nos primeiros 15s, retira-se, com auxílio de uma espátula, a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e à pá e que não foi suficientemente misturada, colocando-a no interior da cuba.. Durante o tempo restante a argamassa fica em repouso. Imediatamente após este intervalo, liga-se o misturador na velocidade alta, por mais 1min (FIGURA 5.7).

De maneira geral, após esse procedimento algumas misturas ainda não apresentavam uma boa homogeneização entre os materiais, principalmente as que envolviam maiores quantidades do resíduo, necessitando de uma mistura complementar, que foi realizada manualmente.

Conforme mencionado anteriormente, foi necessário acréscimo de água após a mistura para melhoria das condições de trabalhabilidade de algumas argamassas. Para esse ajuste, a mistura também foi realizada manualmente.

5.4.4- Determinação da consistência das misturas

Antes da moldagem dos corpos-de-prova, todas as misturas ensaiadas tiveram sua consistência determinada pelo abatimento do corpo-de-prova troncocônico, segundo anexo da NBR 7215 (1993) - Determinação do índice de consistência (FIGURA 5.8).

Antes de efetuar a mistura, a mesa do aparelho de consistência e a fôrma troncocônica são ligeiramente lubrificadas com óleo mineral. A fôrma é colocada sobre a mesa, bem centrada, com sua base maior apoiada sobre ela. Com uma espátula, a argamassa é colocada na fôrma em três camadas sensivelmente da mesma altura e, com soquete normal, aplica-se sobre a primeira camada 15 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos. Da mesma forma, em seguida aplica-se 10 golpes na segunda camada e 5 na terceira. Terminada essa operação, o material que ultrapassa a borda superior é removido e o topo é alisado.

Terminado o enchimento, a fôrma é retirada, levantando-a verticalmente com cuidado. Em seguida, move-se a manivela do aparelho para medida de consistência, fazendo com que a mesa caia 30 vezes em aproximadamente 30s, o que provoca o abatimento do tronco de cone de argamassa.

A medida do diâmetro da base do tronco de cone de argamassa, após o abatimento, é feita com auxílio do paquímetro e expressa em milímetros. O índice de consistência da argamassa é a média aritmética das medidas de dois diâmetros ortogonais. O ensaio deve ser repetido sempre que houver diferença maior que 5 mm entre as duas medidas (FIGURA 5.8).

5.4.5- Moldagem dos corpos-de-prova

A moldagem dos corpos-de-prova seguiu as recomendações da NBR 7215 (1993) da ABNT.

O enchimento dos moldes deve ser feito com a maior rapidez possível. A colocação da argamassa na fôrma é feita com auxílio da espátula. Para os corpos-de-prova destinados aos ensaios de resistência mecânica, a moldagem é feita em 4 camadas, de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete normal, homogeneamente distribuídos. Para a moldagem dos corpos-de-prova destinados aos ensaios de lixiviação e solubilização, adaptou-se as recomendações do método às características de trabalhabilidade dos moldes, sendo realizada em três camadas com 10 golpes com o lado contrário do soquete normal. Essa operação deve ser terminada com a regularização do topo dos corpos-de-prova (FIGURA 5.9).

5.4.6- Cura dos corpos-de-prova

Após a moldagem, os corpos-de-prova permaneceram durante 20 a 24 horas fora da câmara úmida para cura inicial, sendo a face superior protegida por uma placa de vidro.

Terminado este período, os corpos-de-prova são retirados das fôrmas, identificados e são colocados na câmara úmida, onde devem permanecer até o momento do ensaio (FIGURA 5.10).

5.4.7- Capeamento dos corpos-de-prova

Antes de serem submetidos aos ensaios de resistência mecânica, os corpos-de-prova de ϕ 5cm x 10cm foram capeados com uma mistura aquecida de enxofre, de acordo com o método de ensaio NBR 7215 (1993) da ABNT (FIGURA 5.11).

O capeamento efetuado com o auxílio de formas guias, tem a finalidade de eliminar as imperfeições dos topos dos corpos-de-prova, alisando-os e permitindo um perfeito ajuste entre os mesmos e os pratos da prensa para o ensaio de resistência mecânica.

5.4.8- Ensaios de resistência mecânica das misturas solidificadas

Os ensaios de resistência mecânica consistiram em submeter as misturas solidificadas às cargas de compressão, aplicadas no sentido do eixo longitudinal do

corpo-de-prova, segundo as recomendações da NBR 7215 (1993), Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão (FIGURA 5.12).

A resistência à compressão de cada corpo-de-prova foi obtida dividindo-se a carga de ruptura, valor máximo assinalado pelo dinamômetro da máquina durante o ensaio, pela área da seção do corpo-de-prova.

A resistência média à compressão de cada mistura, corresponde à média aritmética dos resultados individuais dos corpos-de-prova ensaiados.

Para uma série de 6 corpos-de-prova, desprezou-se os resultados dos defeituosos e dos que se afastaram mais de 10% da média.

5.4.9- Ensaio de lixiviação das misturas solidificadas

O ensaio de lixiviação procura reproduzir, em laboratório, os fenômenos de arraste, de diluição e de dissorção que ocorrem pela passagem de água através do resíduo encapsulado, quando disposto (FIGURA 5.13). Esse ensaio foi realizado adaptando-se as recomendações da NBR 10005 (1987) - Lixiviação de Resíduos, às características dos corpos-de-prova utilizados, conforme descrito a seguir:

- a) Os corpos-de-prova são retirados da câmara úmida no dia anterior à data de ensaio, sendo lavados com água destilada e colocados para secar ao ar;
- b) Cada corpo-de-prova é pesado em balança eletrônica;
- c) Em seguida, os corpos-de-prova foram fixados às hastes do aparelho de Jar Test e então introduzidos no extrator, onde foi adicionada água destilada na razão sólido/água de 1:16 em massa (para cada corpo-de-prova).
- d) Iniciada a agitação, ajustou-se o pH, se este for inferior ou igual a 5,0, não deve ser alterado; se for superior a 5,0, deve ser corrigido para 5,0 (com variação de $\pm 0,2$) mediante adição de ácido acético 0,5 N.
- e) Em seguida, o pH foi medido em três etapas: a primeira após 15 min, a segunda após 30 min e a terceira após 60 min, contados a partir do final da etapa anterior. Se houver variação do pH em qualquer uma das etapas, deve-se corrigir para 5,0 (com variação de $\pm 0,2$) e repetir essa etapa até que a variação do pH seja igual ou inferior a 0,5 unidades. Se não houver variações, são desnecessárias novas medições até o final da agitação.

Nota: A quantidade máxima de ácido a ser utilizado durante a operação deve ser de 4,0 mL/g da massa do corpo-de-prova, mesmo que as condições de pH não sejam atingidas.

f) A NBR 10005 (1987) estabelece que após o ajuste de pH, deve-se estender a agitação por um período de 24 horas. Por questões operacionais, adotou-se o procedimento de efetuar a agitação em 3 períodos de no mínimo 6 horas. Este procedimento foi fixado, após ter sido constatado que amostras de mesmo traço e idade, quando ensaiadas com diferentes tempos de agitação, não apresentaram uma variação significativa na concentração final do extrato lixiviado, conforme demonstrado nas TABELAS 6.1 e 6.2.

g) Concluída a agitação, foi adicionada uma quantidade de água deionizada calculada pela expressão:

$$m_1 = 4m - m_2$$

onde:

m_1 = massa de água adicionada (g)

m = massa de amostra submetida ao ensaio (g) = massa do corpo-de-prova

m_2 = massa de ácido acético adicionado (g)

Nota: as massas específicas da água destilada e da solução de ácido acético foram consideradas iguais a 1g/cm^3 .

h) Em seguida, foi coletada uma amostra do líquido resultante e este foi filtrado à vácuo (FIGURA 5.15), segundo procedimento descrito pela NBR 10005 (1987).

i) As amostras obtidas por filtração (lixiviado), foram então conservadas e submetidas às análises químicas para determinação da concentração dos metais pesados. As análises químicas de determinação da concentração dos íons metálicos e de outros poluentes no lixiviado são efetuadas por espectrometria de absorção atômica (FIGURA 5.16), conforme recomendações do Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater - A.P.H.A (1992).

5.4.10- Ensaio de solubilização das misturas solidificadas

O ensaio de solubilização procura reproduzir as condições naturais de um resíduo disposto no solo e sujeito ao contato de águas pluviais e/ou subterrâneas (FIGURA 5.14).

Os ensaios de solubilização foram realizados adaptando-se as recomendações da NBR 10006 (1987) - Solubilização de Resíduos Sólidos, às características dos corpos-de-prova utilizados, conforme descrito a seguir:

- a) Os corpos-de-prova são retirados da câmara úmida no dia anterior à data de ensaio sendo lavados com água destilada e secados ao ar (base seca).
- b) Cada corpo-de-prova é pesado em balança eletrônica;
- c) Em seguida, os corpos-de-prova são fixados às hastes do aparelho de Jar Test, sendo introduzidos em um frasco (erlenmeyer) contendo água destilada, adicionada na razão sólido/água de 1:4 em massa (para cada corpo-de-prova).
- d) Agitou-se os corpos-de-prova por 5 min;
- e) Os corpos-de-prova foram desprendidos das hastes e permaneceram dentro do frasco, que foi tampado, durante 7 dias.
- f) Após esse período, a solução deve ser filtrada em equipamento guarnecido de membrana filtrante com $0,45 \mu\text{m}$ de porosidade (FIGURA 5.15);
- e) O filtrato foi submetido à análise de sua composição química, por espectrometria de absorção atômica (FIGURA 5.16).

5.4.11- Difração de raios-X

A difração de raios-X possibilitou a determinação de elementos que compõem a matriz cristalina, através de uma análise qualitativa realizada pelo difratômetro do Laboratório de Raios-X do Instituto de Física da USP - São Carlos (FIGURA 5.18). Para isso, foram moldadas pastilhas de argamassa cimento-resíduo nos traços 1:3 e 1:5, que foram ensaiadas aos 28 dias de idade (FIGURA 5.17).

O difratômetro está conectado a um microcomputador que efetua uma varredura para listagem de possíveis compostos presentes na pastilha, utilizando o banco de dados do "Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS)". Neste arquivo estão catalogadas cerca de 30000 substâncias inorgânicas. A identificação dos compostos presentes na pastilha é feita pela comparação entre os picos do difratograma e do arquivo. Os metais de interesse são inseridos como dados no computador, que realiza uma busca, identificando os possíveis compostos metálicos presentes.

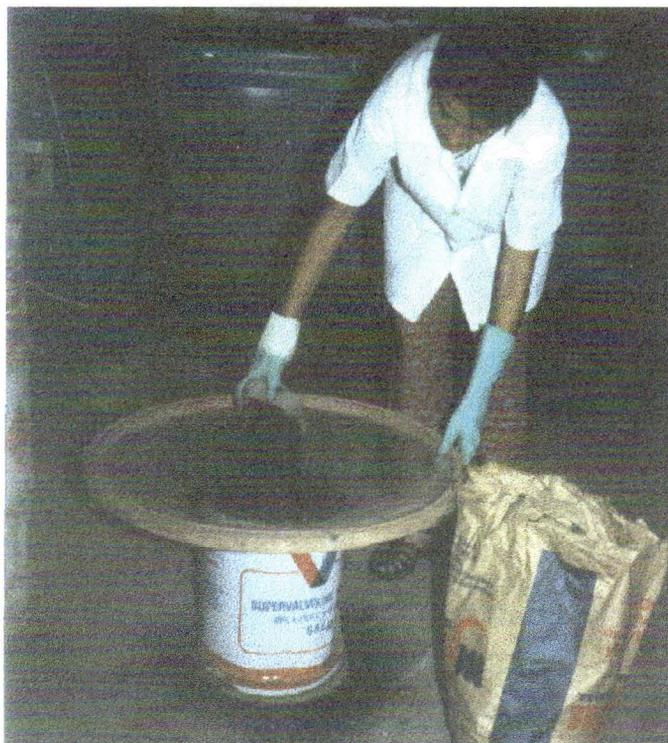


FIGURA 5.5- Secagem e peneiramento do resíduo

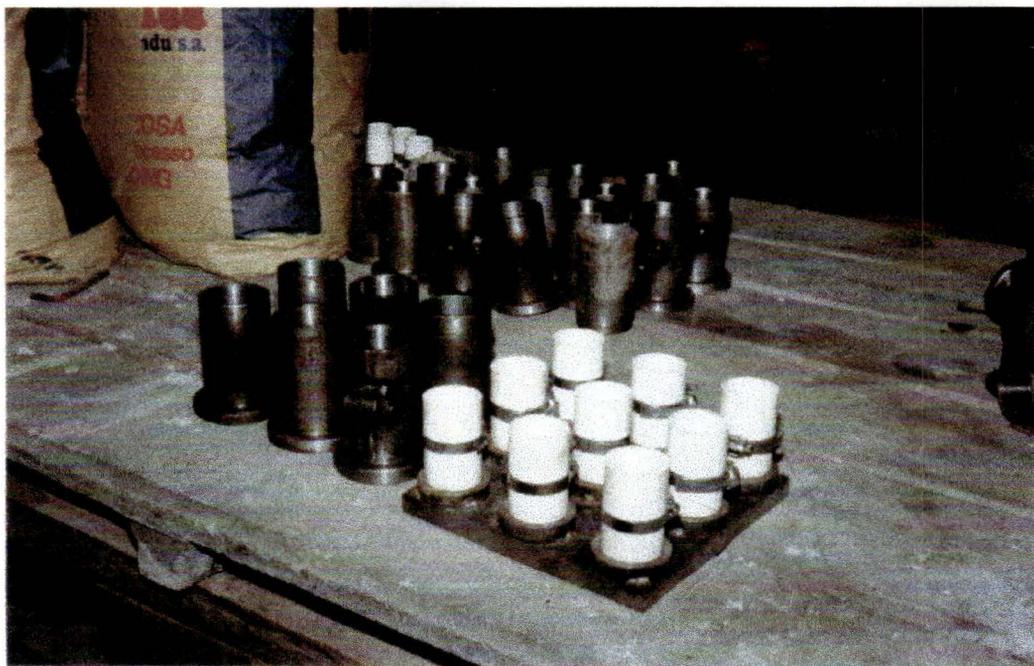


FIGURA 5.6- Moldes para ensaio de resistência (à esq.) e para ensaios de lixiviação-solubilização (à dir.)

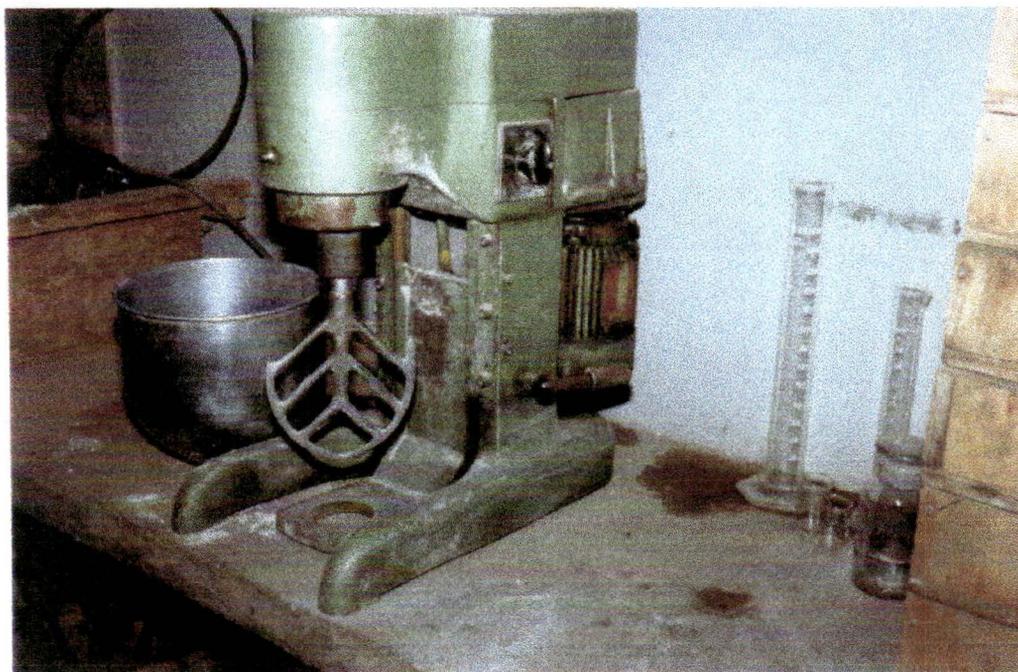


FIGURA 5.7- Argamassadeira utilizada para o preparo das misturas

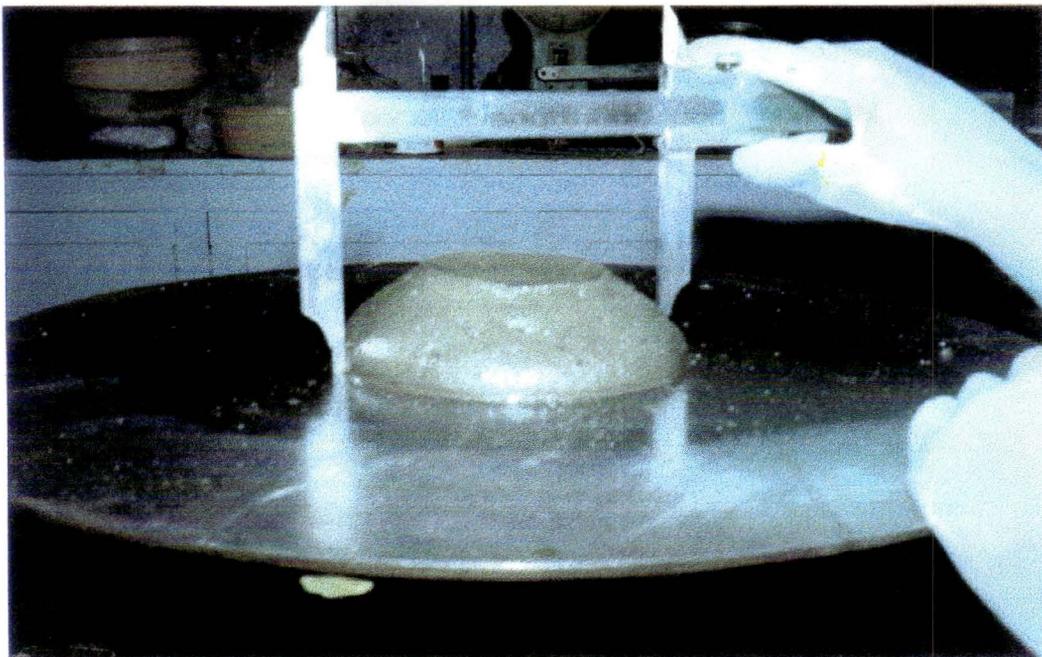


FIGURA 5.8- Aspecto da determinação da consistência da mistura



FIGURA 5.9- Aspecto da moldagem dos corpos-de-prova

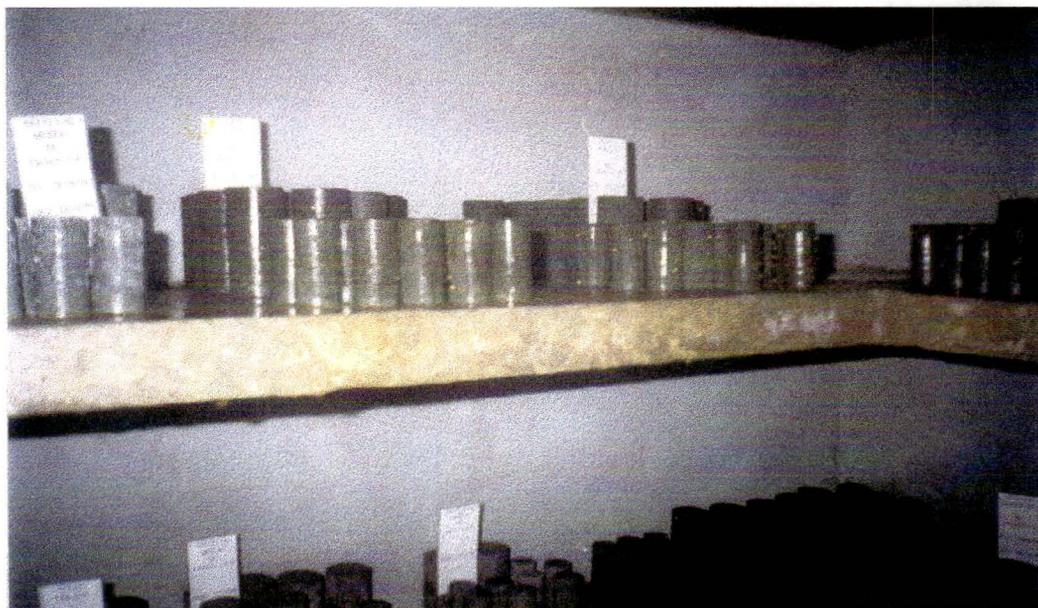


FIGURA 5.10- Cura dos corpos-de-prova



FIGURA 5.11- Corpos-de-prova capeados para ensaio de resistência mecânica

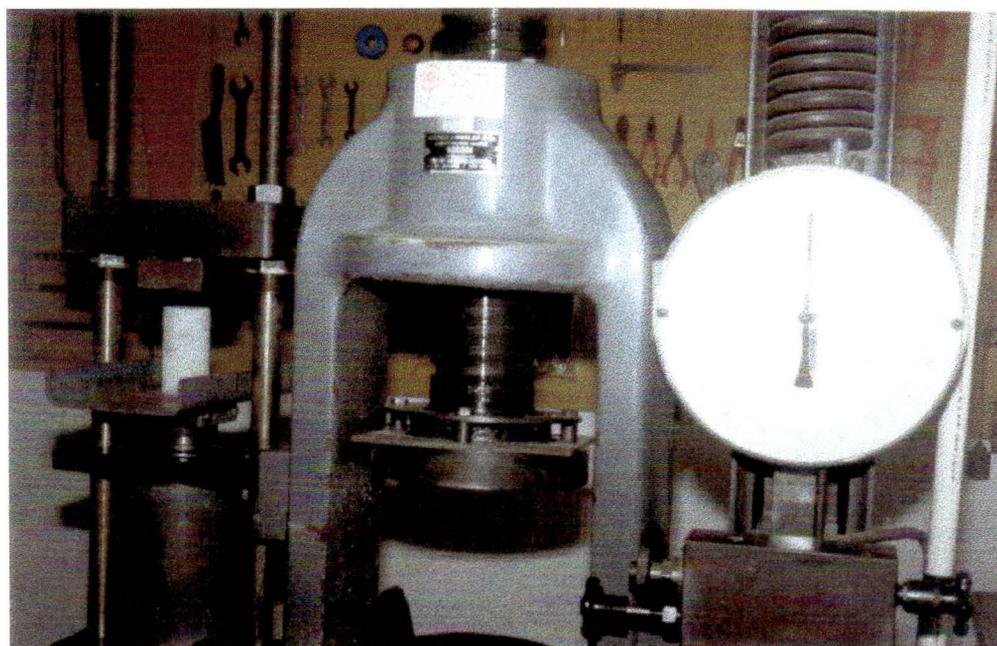


FIGURA 5.12- Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão



FIGURA 5.13- Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de lixiviação



FIGURA 5.14- Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de solubilização



FIGURA 5.15- Esquema para filtração das amostras



FIGURA 5.16- Espectrofotômetro de absorção atômica utilizado no trabalho (Intralab AA-1275)



FIGURA 5.17- Pastilhas moldadas para o ensaio de difração de raio-X

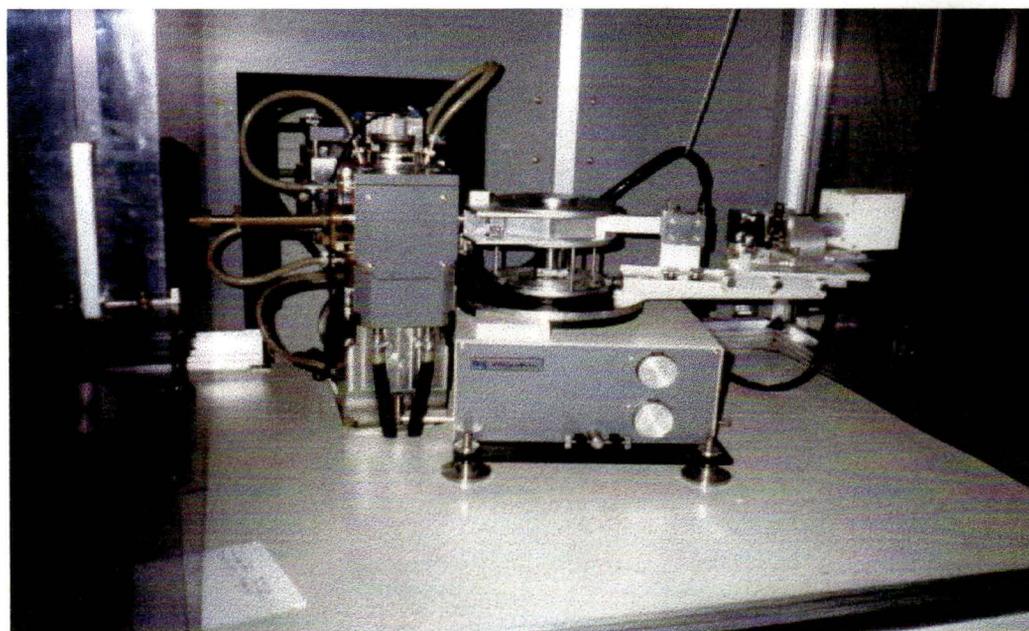


FIGURA 5.18- Difratorômetro de raio-X utilizado no trabalho (Gerador Rigaku - RU 200B)

6- RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

6.1- ANÁLISE DA POSSÍVEL INFLUÊNCIA DO TEMPO DE AGITAÇÃO

TABELA 6.1- Ensaio de lixiviação com tempo de agitação variado (traço 1:3)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M. (mg/L)
	tempo de agitação (horas)			
	8	16	24	
Cd	nd	nd	nd	-
Cr	nd	nd	nd	0,5
Cu	0,03	0,03	0,02	5,0
Fe	nd	nd	nd	-
Mn	nd	nd	nd	-
Ni	nd	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0
Zn	nd	nd	nd	-

TABELA 6.2- Ensaio de lixiviação com tempo de agitação variado (traço 1:5)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M. (mg/L)
	tempo de agitação (horas)			
	8	16	24	
Cd	nd	nd	nd	-
Cr	0,05	0,08	0,04	0,5
Cu	0,01	0,01	0,01	5,0
Fe	nd	nd	nd	-
Mn	nd	nd	nd	-
Ni	nd	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0
Zn	0,05	0,10	0,03	-

6.2- ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

TRAÇO 1:3

TABELA 6.3- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:3 (7 dias)

c.p. nº	tensão de ruptura (MPa)	
	pontual	média
1	11,97	11,50
2	11,46	
3	11,61	
4	11,16	
5	11,61	
6	11,16	

TABELA 6.4- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:3 (28 dias)

c.p. nº	tensão de ruptura (MPa)	
	pontual	média
1	16,10	16,17
2	16,15	
3	15,28	
4	18,19*	
5	16,71	
6	16,61	

* valor descartado (desvio padrão máximo acima de 6%) - NBR 7215 (1993).

TABELA 6.5- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:3 (90 dias)

c.p. n ^o	tensão de ruptura (MPa)	
	pontual	média
1	20,63	21,49
2	22,01	
3	19,56*	
4	22,36	
5	20,95	
6	24,10*	

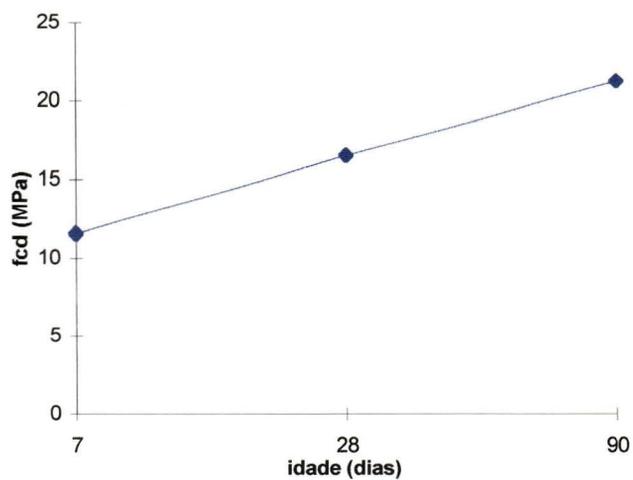


FIGURA 6.1- Resistência à compressão em função da idade (traço 1:3)

TRAÇO 1:5

TABELA 6.6- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:5 (7 dias)

c.p. nº	tensão de ruptura (MPa)	
	pontual	média
1	5,50	5,57
2	6,16*	
3	5,45	
4	5,45	
5	5,86	
6	6,32*	

TABELA 6.7- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:5 (28 dias)

c.p. nº	tensão de ruptura (MPa)	
	pontual	média
1	8,66	8,21
2	8,51	
3	8,41	
4	7,74	
5	7,72	
6	7,16*	

TABELA 6.8- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:5 (90 dias)

c.p. n ^o	tensão de ruptura (MPa)	
	pontual	média
1	12,74	12,74
2	12,48	
3	12,33	
4	11,72*	
5	13,25	
6	12,89	

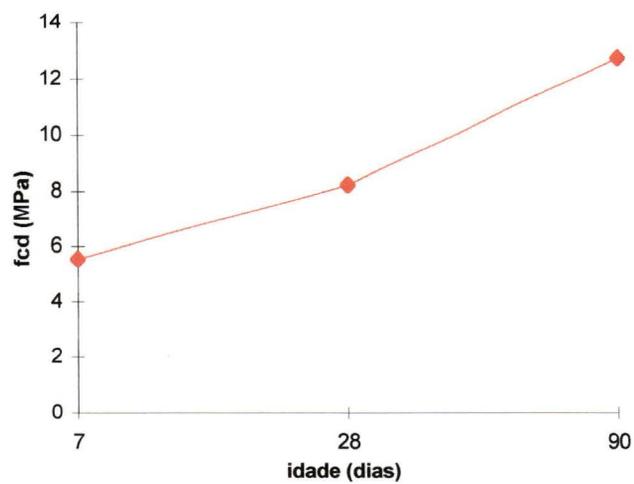


FIGURA 6.2- Resistência à compressão em função da idade (traço 1:5)

TRAÇO 1:8

TABELA 6.9- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:8 (7 dias)

c.p. nº	tensão de ruptura (MPa)	
	pontual	média
1	1,78*	2,02
2	2,04	
3	1,94	
4	1,94	
5	2,14	
6	2,24*	

TABELA 6.10- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:8 (28 dias)

c.p. nº	tensão de ruptura (MPa)	
	pontual	média
1	4,28	4,29
2	4,38	
3	4,74*	
4	4,38	
5	4,18	
6	4,23	

TABELA 6.11- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:8 (90 dias)

c.p. n ^o	tensão de ruptura (MPa)	
	pontual	média
1	6,01	5,95
2	5,91	
3	6,06	
4	5,96	
5	5,86	
6	5,88	

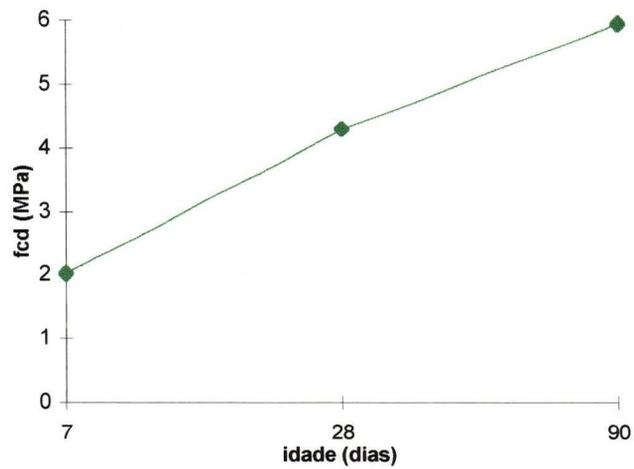


FIGURA 6.3- Resistência à compressão em função da idade (traço 1:8)

TRAÇO 1:10

TABELA 6.12- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:10 (7 dias)

c.p. n°	tensão de ruptura (MPa)	
	pontual	média
1	1,78	1,81
2	1,83	
3	1,86	
4	2,04*	
5	1,78	
6	1,81	

TABELA 6.13- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:10 (28 dias)

c.p. n°	tensão de ruptura (MPa)	
	pontual	média
1	3,67	3,59
2	3,72	
3	3,41	
4	3,67	
5	3,52	
6	3,52	

TABELA 6.14- Ensaio de resistência à compressão - traço 1:10 (90 dias)

c.p. n ^o	tensão de ruptura (MPa)	
	pontual	média
1	5,09	4,89
2	4,94	
3	4,64	
4	5,04	
5	4,79	
6	4,84	

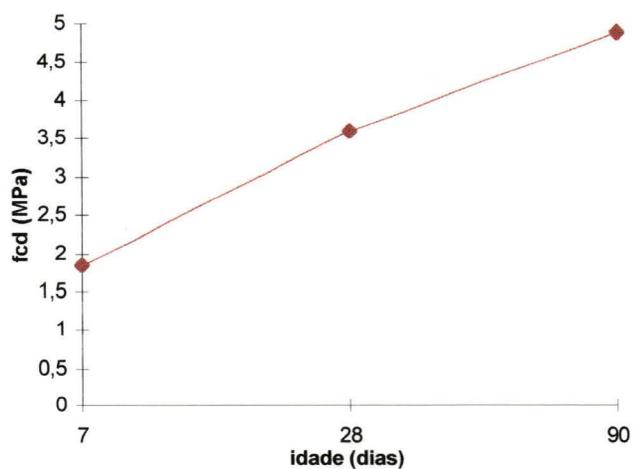


FIGURA 6.4- Resistência à compressão em função da idade (traço 1:10)

TABELA 6.15- Resistência média das matrizes de areia de fundição de descarte

traço	Resistência à compressão (MPa)		
	7 dias	28 dias	90 dias
1:3	11,50	16,17	21,49
1:5	5,57	8,21	12,74
1:8	2,02	4,29	5,95
1:10	1,81	3,59	4,89

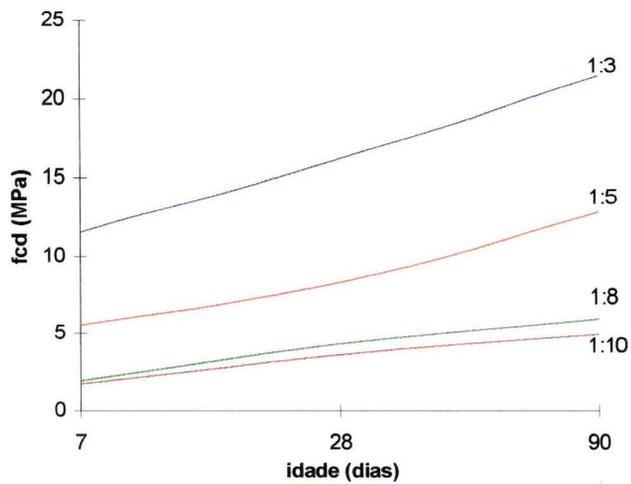


FIGURA 6.5- Resistência média das matrizes ensaiadas

6.3- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO

TRAÇO 1:3

TABELA 6.16- Lixiviação e solubilização - traço 1:3 (7 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M. ² (mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2	
Al	0,34	-	-	-	1,33	-	0,2
Cd	nd ¹	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	0,04	nd	nd	5,0	nd	0,06	0,05
Cu	0,02	nd	0,01	-	0,01	0,02	1,0
Fe	nd	nd	nd	-	nd	nd	0,3
Mn	0,01	0,05	0,04	-	nd	0,01	0,1
Ni	nd	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,05	0,25	0,18	-	0,04	0,04	5,0

¹ nd, elemento não detectado

² L.M. - Limite Máximo permitido pela NBR 10004 (1987) da ABNT.

TABELA 6.17- Lixiviação e solubilização - traço 1:3 (28 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M.(mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2	
Al	nd	-	-	-	0,81	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	0,08	nd	nd	5,0	0,11	0,06	0,05
Cu	0,02	0,03	0,03	-	0,01	0,02	1,0
Fe	nd	nd	nd	-	nd	nd	0,3
Mn	0,01	0,02	0,02	-	nd	0,01	0,1
Ni	nd	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,06	0,02	0,09	-	0,04	0,04	5,0

TABELA 6.18- Lixiviação e solubilização - traço 1:3 (90 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M.(mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2	
Al	0,32	-	-	-	0,7	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	0,06	nd	0,01	5,0	0,05	0,03	0,05
Cu	0,01	0,02	nd	-	0,02	0,01	1,0
Fe	nd	nd	nd	-	0,03	nd	0,3
Mn	nd	nd	nd	-	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,07	0,05	0,05	-	0,09	0,20	5,0

TRAÇO 1:5

TABELA 6.19- Lixiviação e solubilização - traço 1:5 (7 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M.(mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2	
Al	0,32	-	-	-	1,89	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	0,06	0,09	nd	5,0	0,10	0,16	0,05
Cu	0,02	0,01	0,03	-	0,02	0,01	1,0
Fe	nd	nd	nd	-	nd	nd	0,3
Mn	0,02	0,05	nd	-	0,02	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,04	0,04	nd	-	0,08	0,02	5,0

TABELA 6.20- Lixiviação e solubilização - traço 1:5 (28 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M.(mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2	
Al	0,76	-	-	-	1,10	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	0,08	0,08	0,07	5,0	0,12	0,11	0,05
Cu	0,01	0,02	0,01	-	nd	0,01	1,0
Fe	nd	nd	0,53	-	0,02	nd	0,3
Mn	0,02	0,01	0,03	-	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,02	0,05	0,07	-	0,02	0,01	5,0

TABELA 6.21- Lixiviação e solubilização - traço 1:5 (90 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M.(mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2	
Al	nd	-	-	-	0,76	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	0,08	0,05	0,08	5,0	0,08	0,12	0,05
Cu	0,02	0,01	0,01	-	0,01	0,02	1,0
Fe	nd	nd	nd	-	nd	nd	0,3
Mn	nd	nd	nd	-	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,12	0,05	0,10	-	0,05	0,01	5,0

TRAÇO 1:8

TABELA 6.22- Lixiviação e solubilização - traço 1:8 (7 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M.(mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2	
Al	0,6	-	-	-	2,74	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	0,15	0,08	0,09	5,0	0,20	0,12	0,05
Cu	nd	0,03	0,02	-	nd	0,01	1,0
Fe	nd	0,19	0,11	-	0,08	0,05	0,3
Mn	0,02	0,05	0,04	-	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,15	0,03	0,01	-	0,21	0,30	5,0

TABELA 6.23- Lixiviação e solubilização - traço 1:8 (28 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M.(mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2	
Al	1,15	-	-	-	1,89	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	nd	nd	nd	5,0	0,16	0,08	0,05
Cu	0,02	0,01	0,02	-	0,01	nd	1,0
Fe	0,04	nd	0,04	-	nd	nd	0,3
Mn	0,02	0,03	0,01	-	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,16	0,07	0,14	-	0,03	0,02	5,0

TABELA 6.24- Lixiviação e solubilização - traço 1:8 (90 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M.(mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2	
Al	nd	-	-	-	nd	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	0,03	0,04	0,03	5,0	0,06	0,14	0,05
Cu	0,02	0,01	nd	-	0,02	nd	1,0
Fe	nd	nd	nd	-	0,03	0,03	0,3
Mn	nd	nd	nd	-	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,17	0,05	0,05	-	0,09	0,01	5,0

TRAÇO 1:10

TABELA 6.25- Lixiviação e solubilização - traço 1:10 (7 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M.(mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2	
Al	0,60	-	-	-	-	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	0,08	0,16	0,08	5,0	0,12	0,13	0,05
Cu	0,02	0,02	0,01	-	0,01	0,02	1,0
Fe	0,12	nd	0,07	-	nd	nd	0,3
Mn	0,04	0,04	0,01	-	nd	0,01	0,1
Ni	nd	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,06	0,07	0,10	-	0,01	0,03	5,0

TABELA 6.26- Lixiviação e solubilização - traço 1:10 (28 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M.(mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2	
Al	0,32	-	-	-	-	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	nd	0,17	0,10	5,0	0,08	0,17	0,05
Cu	nd	0,01	0,01	-	nd	0,01	1,0
Fe	nd	0,06	nd	-	0,06	nd	0,3
Mn	0,01	0,04	0,01	-	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,02	0,01	0,04	-	nd	0,01	5,0

TABELA 6.27- Lixiviação e solubilização - traço 1:10 (90 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)			Lixiviação L.M.(mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2	
Al	0,73	-	-	-	-	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	nd	0,05	0,03	5,0	0,10	0,10	0,05
Cu	0,01	0,02	nd	-	0,02	0,02	1,0
Fe	nd	nd	nd	-	nd	nd	0,3
Mn	nd	nd	nd	-	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,03	0,01	0,04	-	0,15	0,10	5,0

6.4- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO DO CIMENTO

TABELA 6.28- Solubilização do cimento empregado na pesquisa

elemento	Solubilização - cimento bruto (mg/L)		Solubilização - matriz de cimento (mg/L)			Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	amostra 1	amostra 2	amostra 3	
Al	0,98	-	nd	nd	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	nd	nd	0,005
Cr	0,37	0,34	0,04	0,06	0,08	0,05
Cu	0,02	0,02	nd	nd	nd	1,0
Fe	0,04	0,03	nd	nd	nd	0,3
Mn	0,02	0,01	nd	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	nd	nd	0,05
Zn	0,04	0,04	0,02	0,03	0,14	5,0

6.5- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO DA ÁGUA DESTILADA

TABELA 6.29- Solubilização da água destilada

elemento	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2	
Al	nd	-	0,2
Cd	nd	nd	0,005
Cr	nd	nd	0,05
Cu	nd	nd	1,0
Fe	nd	nd	0,3
Mn	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	-
Pb	nd	nd	0,05
Zn	nd	nd	5,0

6.6- RESULTADOS DA SOLUBILIZAÇÃO MÚLTIPLA DAS MATRIZES DE CIMENTO E AREIA DE FUNDIÇÃO DE DESCARTE

TABELA 6.30- Solubilização múltipla - traço 1:3

elemento	Solubilização múltipla (mg/L)				Solubilização L.M.(mg/L)
	1ª extração	2ª extração	3ª extração	4ª extração	
Al	0,81	1,97	1,14	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	nd	0,005
Cr	0,07	nd	0,03	0,03	0,05
Cu	nd	0,01	nd	nd	1,0
Fe	nd	nd	nd	nd	0,3
Mn	nd	nd	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	nd	0,05
Zn	0,02	0,02	nd	0,10	5,0

TABELA 6.31- Solubilização múltipla - traço 1:5

elemento	Solubilização múltipla (mg/L)				Solubilização L.M.(mg/L)
	1ª extração	2ª extração	3ª extração	4ª extração	
Al	1,10	0,97	0,32	-	0,2
Cd	nd	nd	nd	nd	0,005
Cr	0,14	0,01	0,05	0,01	0,05
Cu	nd	0,01	nd	nd	1,0
Fe	nd	nd	nd	nd	0,3
Mn	nd	nd	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	nd	0,05
Zn	0,02	0,05	nd	0,03	5,0

TABELA 6.32- Solubilização múltipla - traço 1:8

elemento	Solubilização - matriz de cimento (mg/L)			Solubilização L.M.(mg/L)
	1ª extração	2ª extração	3ª extração	
Al	0,10	0,79	0,70	0,2
Cd	nd	nd	nd	0,005
Cr	0,06	0,05	0,05	0,05
Cu	0,02	0,01	nd	1,0
Fe	nd	nd	nd	0,3
Mn	nd	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	0,05
Zn	0,05	nd	nd	5,0

6.7- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO - TRAÇO 1:2

TABELA 6.33- Solubilização - traço 1:2 (7 dias)

elemento	Solubilização (mg/L)	Solubilização L.M.(mg/L)
Al	0,16	0,2
Cd	nd	0,005
Cr	nd	0,05
Cu	nd	1,0
Fe	nd	0,3
Mn	nd	0,1
Ni	nd	-
Pb	nd	0,05
Zn	nd	5,0

6.8- DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

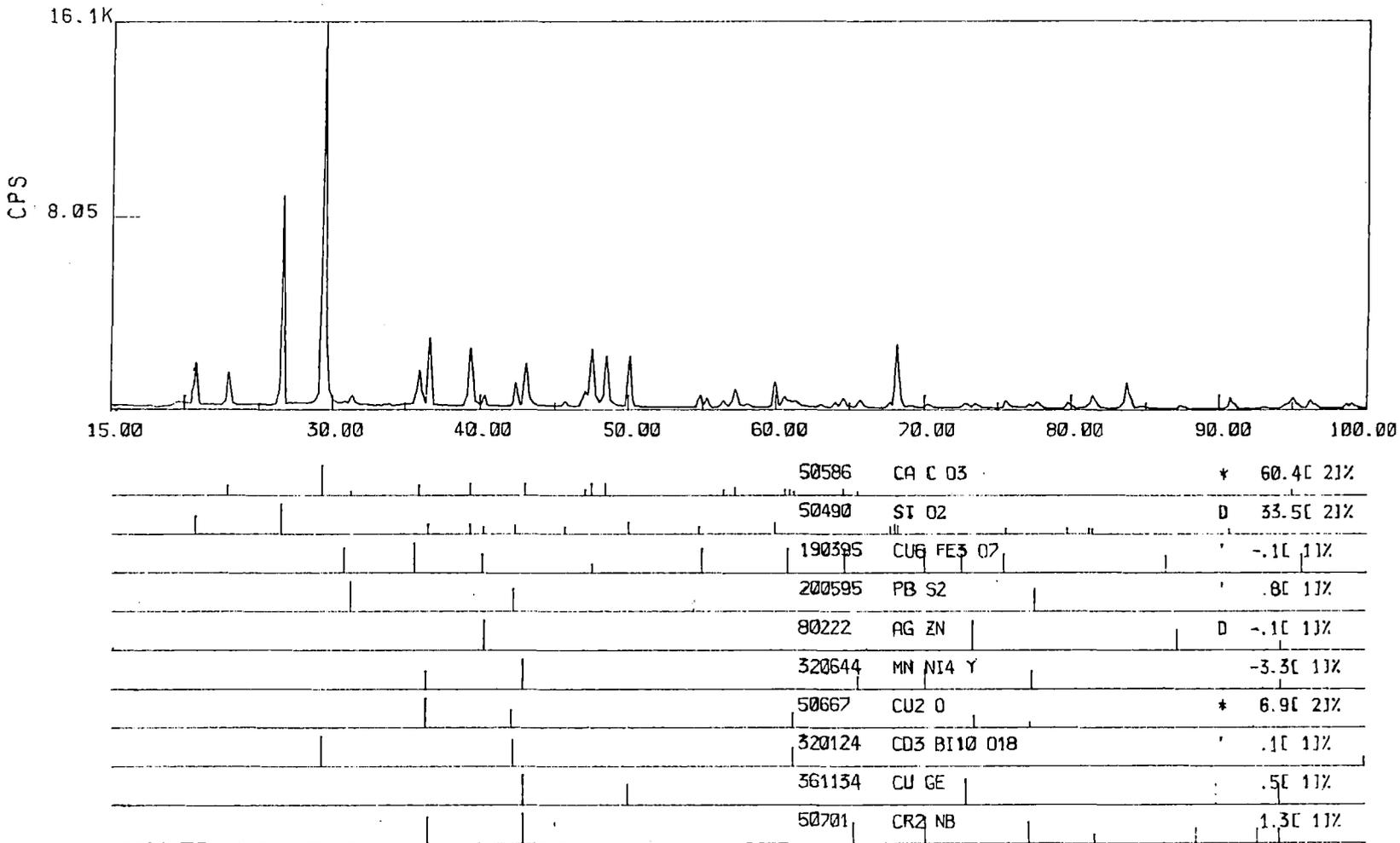


FIGURA 6.6a- Difratograma da matriz solidificada - traço 1:3 (28 dias)

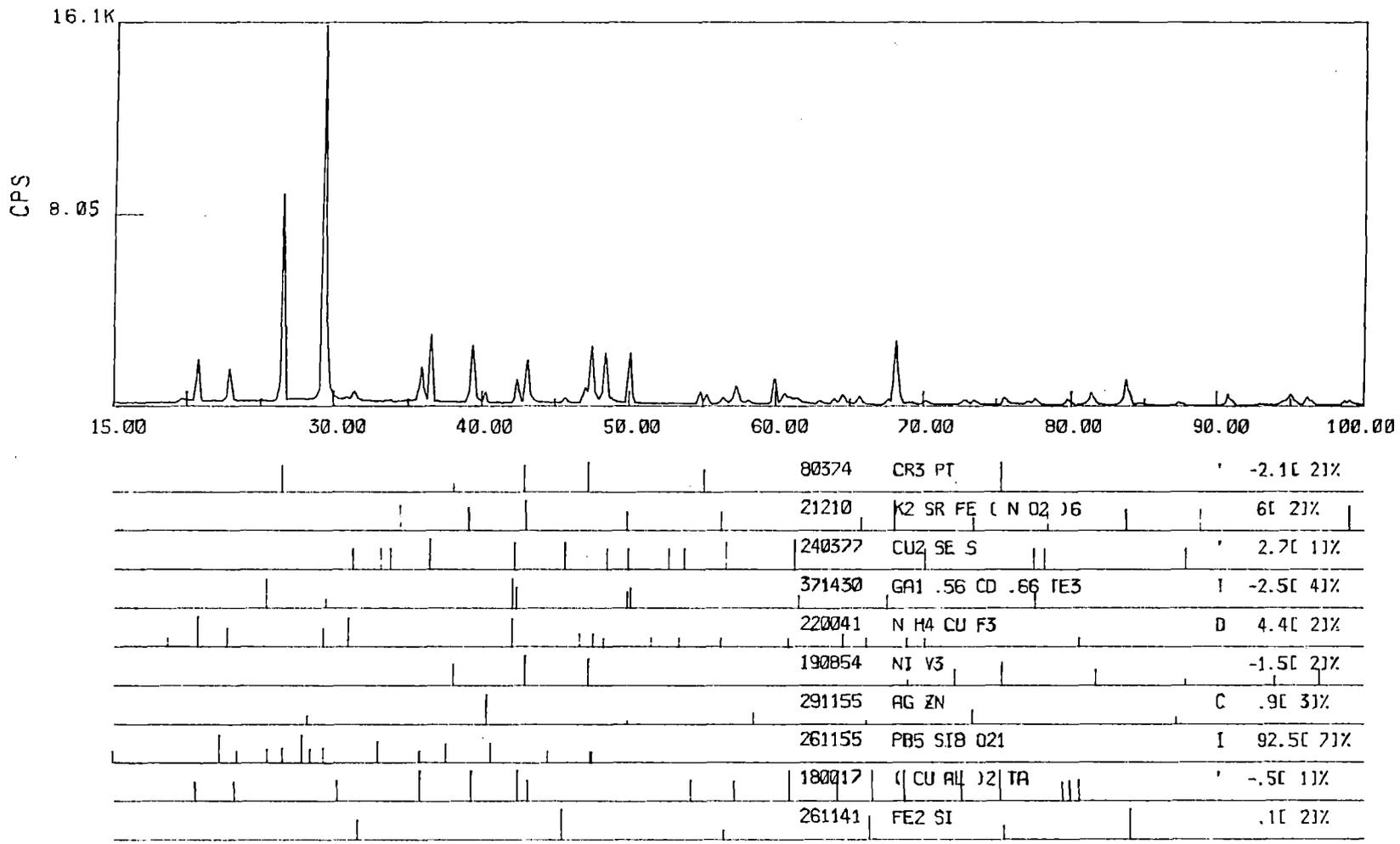


FIGURA 6.6b- Difratograma da matriz solidificada - traço 1:3 (28 dias)

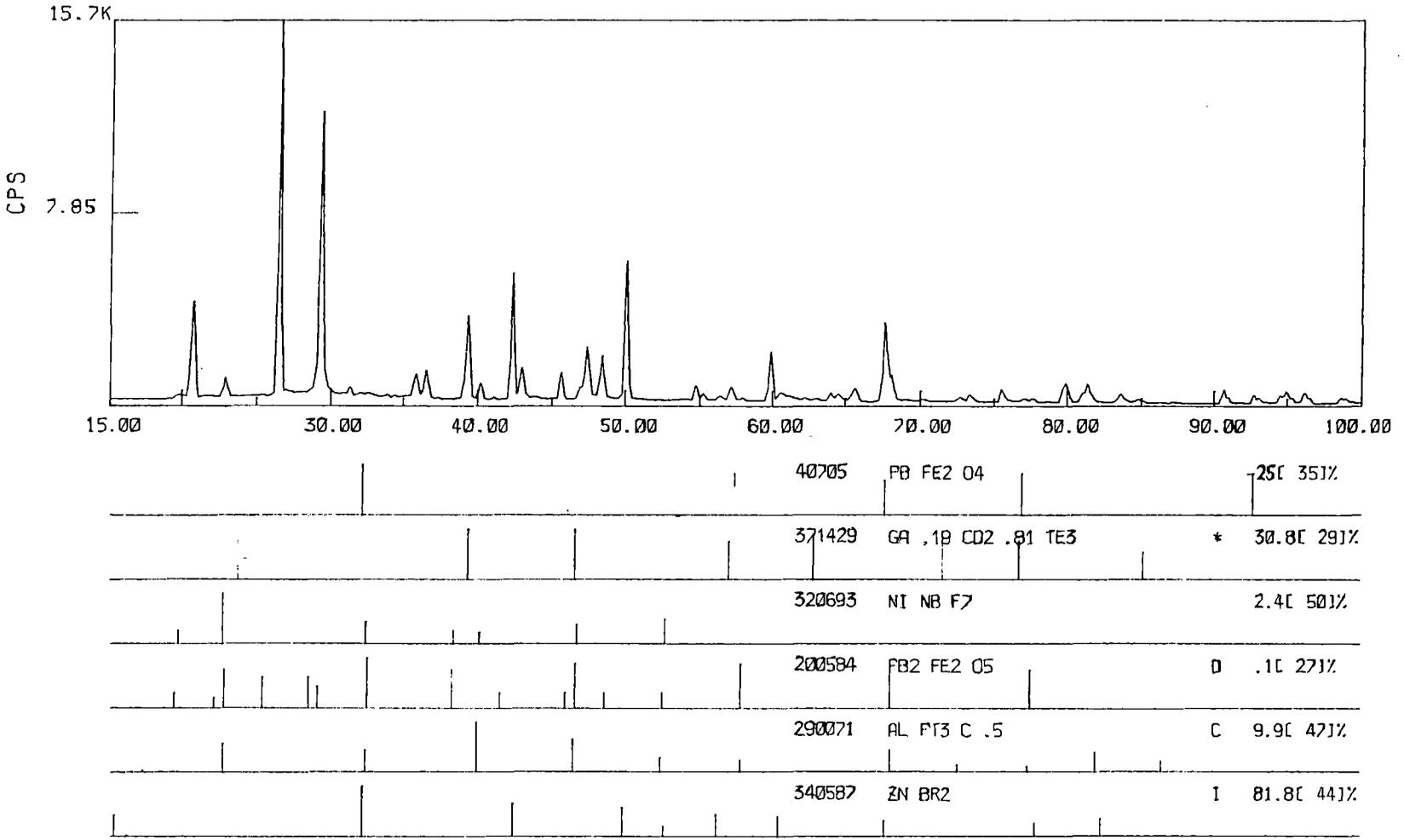


FIGURA 6.7a- Difratograma da matriz solidificada - traço 1.5 (28 dias)

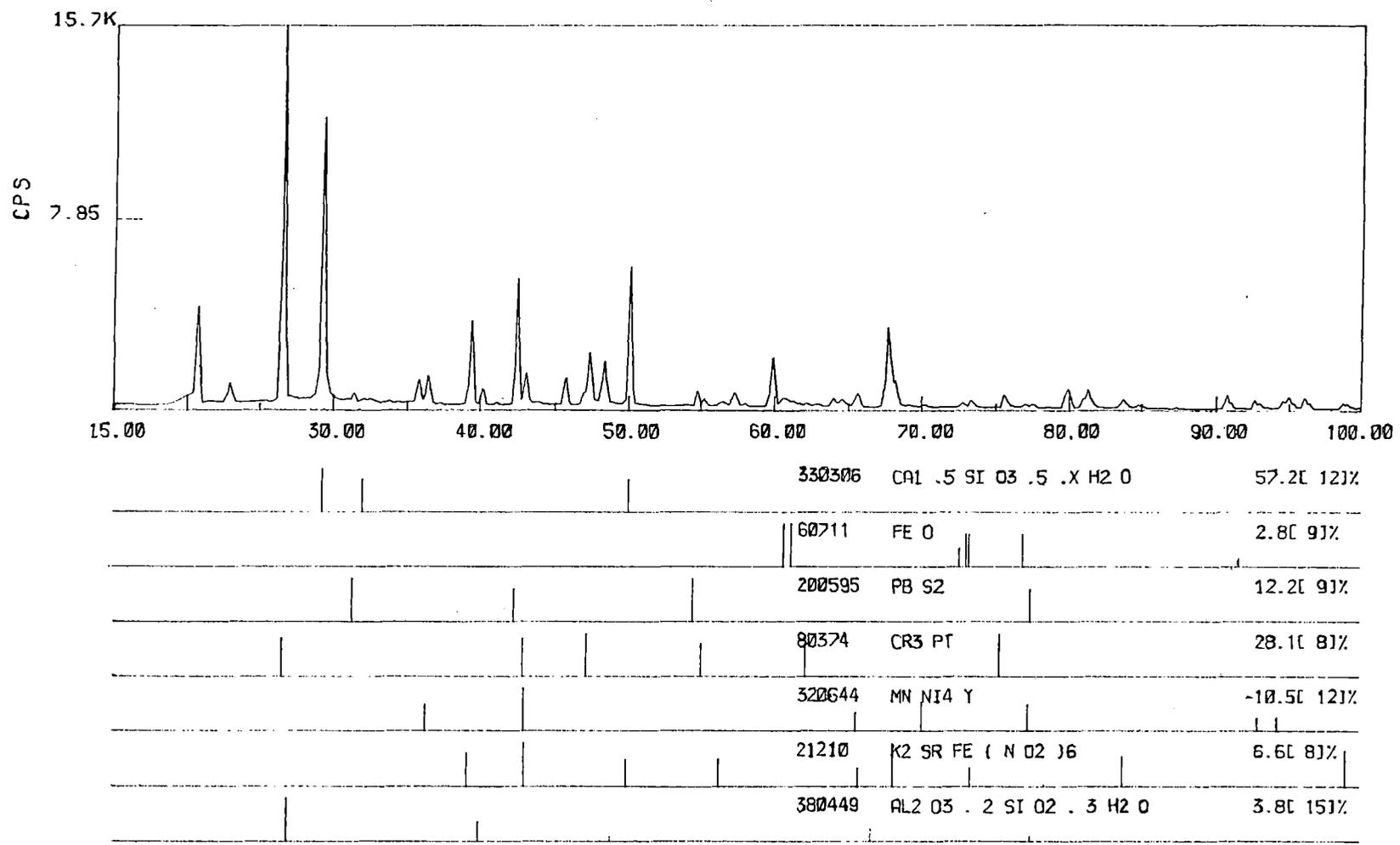


FIGURA 6.7b- Difratograma da matriz solidificada - traço 1:5 (28 dias)

7- DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1- MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

A moldagem dos corpos-de-prova considerou as características dos ensaios aos quais eles seriam posteriormente submetidos, sendo preparada argamassa suficiente para a confecção de todos os corpos-de-prova referentes à cada traço cimento-resíduo.

Este cuidado é necessário para que a análise posterior dos resultados dos diversos ensaios, em suas várias datas de execução, possa ser feita de forma integrada. Se não houvesse esse rigor seria mais difícil constatar contaminações externas ao processo, possivelmente mascarando resultados e induzindo a falsas conclusões.

Em termos de trabalhabilidade das misturas, foi evidente que a quantidade de resíduo (areia de fundição) presente nos traços 1:8 e 1:10 dificultou a homogeneização dos materiais e reduziu a coesão entre eles, comparativamente aos traços 1:3 e 1:5. Isso acarretou uma segregação do material, principalmente no traço 1:10, com o acúmulo de resíduo na superfície dos corpos-de-prova, facilmente liberado durante o manuseio.

Independente deste comportamento, a possibilidade de retardamento da cura inicial da mistura pela presença do resíduo não foi evidenciada em nenhum momento, mesmo para os traços mais pobres. A desmoldagem dos corpos-de-prova foi absolutamente normal, indicando que o tempo disposto para cura inicial foi suficiente para a obtenção de um sólido monolítico, de rigidez compatível ao proporcionamento entre os materiais.

7.2- RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS MATRIZES SOLIDIFICADAS

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica das matrizes de cimento-resíduo foram bastante animadores no que se refere a possibilidade de reaproveitamento da areia de fundição de descarte em peças para uso na construção civil.

O que se observou da análise de resistência até os 90 dias, é que a curva dos resultados não apresentou um comportamento diferenciado em nenhum momento, ao contrário, mostrou-se bastante regular, coerente ao traço e idade do ensaio (FIGURA 6.5).

- Com relação ao traço cimento-resíduo

Os resultados dos ensaios a que foram submetidos os corpos-de-prova confeccionados com argamassas de cimento e areia de fundição de descarte indicam uma tendência de crescimento da resistência mecânica da matriz solidificada com o enriquecimento do traço cimento-resíduo, destacando-se que os resultados dos ensaios dos corpos-de-prova de traço 1:3 e 1:5, apresentados nas TABELAS 6.3-6.8 e nas FIGURAS 6.1 e 6.2, respectivamente, foram os mais favoráveis sob este aspecto.

- Com relação à idade do corpo-de-prova

Os valores médios de resistência mecânica lançados no FIGURA 6.5, indicam um incremento deste parâmetro ao longo do tempo.

Diante das baixas resistências iniciais encontradas para o traço 1:10 e das dificuldades de trabalhabilidade dessas misturas, descartou-se a possibilidade de emprego de traços maiores que este. A melhor indicação é que se trabalhe com traços menores que 1:8.

No anexo B, são apresentados ensaios realizados com argamassas confeccionadas com areia de emprego comum na construção civil, compostas com granulometria similar à areia de fundição de descarte empregada nesta pesquisa. As condições de trabalhabilidade e os valores de resistência das argamassas produzidas,

foram inferiores aos resultados das argamassas de cimento-resíduo, acentuando a possibilidade de emprego da areia de fundição de descarte como material de construção.

7.3- FIXAÇÃO DOS POLUENTES NAS MATRIZES SOLIDIFICADAS

A propriedade mais importante desejada no processo de encapsulamento de um resíduo é, naturalmente, a capacidade de fixação dos elementos tóxicos na matriz solidificada. Por essa razão, os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização são as referências para análise do processo.

Antes da avaliação do desempenho desta pesquisa, julgou-se necessário explicitar a comparação entre os resultados do ensaio de caracterização do resíduo bruto (TABELA 5.4) e os resultados dos ensaios das matrizes solidificadas (TABELAS 6.16-6.27). Esta comparação foi expressa pela eficiência de fixação dos metais pela matriz ensaiada, estimada com base na seguinte expressão:

$$E_f = \frac{C_i - C_f}{C_i} \cdot 100$$

onde:

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

C_i = concentração do metal no extrato lixiviado do resíduo bruto (mg/L)

C_f = concentração do metal no extrato lixiviado da matriz solidificada (mg/L)

TABELA 7.1- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:3 - 7 dias)

elemento	Lixiviação res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Lixiviação - E_d (%)			Solubilização res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Solubilização - E_s (%)	
		amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2
Al	3,10	89,03	-	-	3,69	63,96	-
Cr	0,09	55,56	100	100	0,12	100	50
Cu	0,03	33,33	100	66,67	0,02	50	0
Fe	0,30	100	100	100	0,34	100	100
Mn	0,05	80	0	20	0,02	100	50
Zn	0,30	83,33	16,67	40	0,08	50	50

TABELA 7.2- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:3 - 28 dias)

elemento	Lixiviação res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Lixiviação - E_n (%)			Solubilização res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Solubilização - E_s (%)	
		amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2
Al	3,10	100	-	-	3,69	78,05	-
Cr	0,09	11,11	100	100	0,12	8,33	50
Cu	0,03	33,33	0	0	0,02	50	0
Fe	0,30	100	100	100	0,34	8,33	50
Mn	0,05	80	60	60	0,02	100	50
Zn	0,30	80	93,33	70	0,08	50	50

TABELA 7.3- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:3 - 90 dias)

elemento	Lixiviação res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Lixiviação - E_n (%)			Solubilização res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Solubilização - E_s (%)	
		amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2
Al	3,10	89,68	-	-	3,69	81,03	-
Cr	0,09	33,33	100	88,89	0,12	58,33	75
Cu	0,03	66,67	33,33	100	0,02	0	50
Fe	0,30	100	100	100	0,34	91,18	100
Mn	0,05	100	100	100	0,02	100	100
Zn	0,30	76,67	83,33	83,33	0,08	não efic.	não efic.

TABELA 7.4- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:5 - 7 dias)

elemento	Lixiviação res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Lixiviação - E_n (%)			Solubilização res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Solubilização - E_s (%)	
		amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2
Al	3,10	89,68	-	-	3,69	48,78	-
Cr	0,09	33,33	0	100	0,12	16,67	não efic.
Cu	0,03	33,33	66,67	0	0,02	0	50
Fe	0,30	100	100	100	0,34	100	100
Mn	0,05	60	0	100	0,02	0	100
Zn	0,30	86,67	86,67	100	0,08	0	75

TABELA 7.5- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:5 - 28 dias)

elemento	Lixiviação res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Lixiviação - E_n (%)			Solubilização res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Solubilização - E_s (%)	
		amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2
Al	3,10	75,48	-	-	3,69	70,19	-
Cr	0,09	não efic.	11,11	22,22	0,12	0	8,33
Cu	0,03	66,67	33,33	66,67	0,02	100	50
Fe	0,30	100	100	não efic.	0,34	94,12	100
Mn	0,05	60	80	40	0,02	100	100
Zn	0,30	93,33	83,33	76,67	0,08	75	87,5

TABELA 7.6- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:5 - 90 dias)

elemento	Lixiviação res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Lixiviação - E_f (%)			Solubilização res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Solubilização - E_s (%)	
		amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2
Al	3,10	100	-	-	3,69	79,40	-
Cr	0,09	11,11	44,44	11,11	0,12	33,33	0
Cu	0,03	33,33	66,67	66,67	0,02	50	0
Fe	0,30	100	100	100	0,34	100	100
Mn	0,05	100	100	100	0,02	100	100
Zn	0,30	60	83,33	66,67	0,08	37,5	87,5

TABELA 7.7- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:8 - 7 dias)

elemento	Lixiviação res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Lixiviação - E_f (%)			Solubilização res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Solubilização - E_s (%)	
		amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2
Al	3,10	80,65	-	-	3,69	25,75	-
Cr	0,09	não efic.	11,11	0	0,12	66,67	0
Cu	0,03	100	0	33,33	0,02	50	100
Fe	0,30	100	36,67	63,33	0,34	76,47	85,29
Mn	0,05	60	0	20	0,02	100	100
Zn	0,30	50	90	96,67	0,08	não efic.	não efic.

TABELA 7.8- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:8 - 28 dias)

elemento	Lixiviação res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Lixiviação - E_f (%)			Solubilização res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Solubilização - E_s (%)	
		amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2
Al	3,10	62,9	-	-	3,69	48,78	-
Cr	0,09	100	100	100	0,12	não efic.	33,33
Cu	0,03	33,33	66,67	33,33	0,02	50	100
Fe	0,30	86,67	100	86,67	0,34	100	100
Mn	0,05	60	40	80	0,02	100	100
Zn	0,30	46,67	76,67	53,33	0,08	62,5	75

TABELA 7.9- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:8 - 90 dias)

elemento	Lixiviação res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Lixiviação - E_f (%)			Solubilização res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Solubilização - E_s (%)	
		amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2
Al	3,10	100	-	-	3,69	100	-
Cr	0,09	66,67	55,56	66,67	0,12	50	não efic.
Cu	0,03	33,33	66,67	100	0,02	0	100
Fe	0,30	100	100	100	0,34	91,18	91,18
Mn	0,05	100	100	100	0,02	100	100
Zn	0,30	43,33	83,33	83,33	0,08	não efic.	87,5

TABELA 7.10- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:10 - 7 dias)

elemento	Lixiviação res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Lixiviação - E_f (%)			Solubilização res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Solubilização - E_s (%)	
		amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2
Al	3,10	80,65	-	-	3,69	-	-
Cr	0,09	11,11	não efic.	11,11	0,12	0	não efic.
Cu	0,03	33,33	33,33	66,67	0,02	50	0
Fe	0,30	60	100	76,67	0,34	100	100
Mn	0,05	20	20	80	0,02	100	50
Zn	0,30	80	76,67	66,67	0,08	87,5	62,5

TABELA 7.11- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:10 - 28 dias)

elemento	Lixiviação res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Lixiviação - E_f (%)			Solubilização res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Solubilização - E_s (%)	
		amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2
Al	3,10	89,68	-	-	3,69	-	-
Cr	0,09	100	não efic.	não efic.	0,12	33,33	não efic.
Cu	0,03	100	66,67	66,67	0,02	100	50
Fe	0,30	100	80	100	0,34	100	100
Mn	0,05	80	20	80	0,02	100	100
Zn	0,30	93,33	96,67	86,67	0,08	100	87,5

TABELA 7.12- Eficiência de fixação das matrizes (traço 1:10 - 90 dias)

elemento	Lixiviação res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Lixiviação - E_f (%)			Solubilização res. bruto (mg/L)	Eficiência de fixação na Solubilização - E_s (%)	
		amostra 1	amostra 2	amostra 3		amostra 1	amostra 2
Al	3,10	76,45	-	-	3,69	-	-
Cr	0,09	100	44,44	66,67	0,12	16,67	16,67
Cu	0,03	66,67	33,33	100	0,02	0	0
Fe	0,30	100	100	100	0,34	100	100
Mn	0,05	100	100	100	0,02	100	100
Zn	0,30	90	96,67	86,67	0,08	não efic.	não efic.

7.4- LIXIVIAÇÃO DOS METAIS NAS MATRIZES SOLIDIFICADAS

Em nenhuma das misturas de resíduo e cimento ensaiadas, as concentrações de metais no lixiviado ultrapassaram os limites estipulados pela NBR 10004 (1987). Todas as matrizes ensaiadas podem dessa forma, ser classificadas como materiais não perigosos.

Com exceção da concentração de Cr de algumas amostras, todas as matrizes ensaiadas, apresentaram uma minimização da concentração dos íons metálicos em relação às concentrações do resíduo bruto.

O Fe foi o elemento mais eficientemente fixado pelas matrizes (TABELAS 7.1-7.12). O traço 1:3, por exemplo, não constatou a lixiviação desse elemento em nenhuma das idades ensaiadas.

Para o traço 1:5, com exceção da amostra 3 aos 28 dias, onde a concentração de Fe (0,53 mg/L) excede o valor obtido no extrato lixiviado do resíduo bruto, todas as amostras apresentaram elevada eficiência na fixação desse elemento.

Os traços 1:8 e 1:10 indicaram uma redução da eficiência de fixação do Fe pelas matrizes solidificadas (TABELAS 7.7-7.12), principalmente nas primeiras idades, isto é, aos 7 e 28 dias. Aos 90 dias contudo, o Fe não foi identificado em nenhum desses traços (TABELAS 6.24 e 6.27).

A observação desses resultados leva à crer que a capacidade de fixação do Fe pela matriz solidificada está diretamente relacionada à sua resistência mecânica.

O Al foi o metal que apareceu em maiores concentrações nos extratos lixiviados das matrizes solidificadas, num comportamento similar ao resíduo bruto. Contudo, a análise da eficiência de fixação desse elemento (TABELAS 7.1-7.12), verificou que para todas as amostras, sem exceção, as concentrações de Al no extrato lixiviado dessas matrizes foram menores do que no resíduo bruto.

Acentuando o comportamento observado na fixação do Fe, a eficiência de fixação do Al tende à ser maior para os traços mais ricos em cimento, variando de 89,03% a 100% para o traço 1:3; 75,48% a 100% para o traço 1:5; 62,90 a 100% para o traço 1:8 e de 76,45% a 89,68% para traço 1:10.

Merece ser observado contudo, que a capacidade de fixação desse elemento por um traço determinado, não mantém uma relação direta com a idade da matriz. Desta forma, para o traço 1:3, por exemplo, o Al não detectado aos 28 dias, foi lixiviado da amostra aos 90 dias (0,32 mg/L).

Os resultados das concentrações de Cr indicaram que este metal não foi minimizado por todas as matrizes ensaiadas (TABELAS 6.16-6.27)

As concentrações obtidas para os traços 1:5 e 1:10 demonstraram as maiores concentrações de Cr no extrato lixiviado das matrizes.

Comportamento surpreendente foi observado para as matrizes de traço 1:8 aos 28 dias: todas as amostras não apresentaram Cr no extrato lixiviado (TABELA 6.23).

Os melhores comportamentos foram verificados para as matrizes de traço 1:3, sugerindo que para traços mais ricos que os estudados, possivelmente poderá ser constatada uma minimização do Cr à valores bem menores.

7.5- SOLUBILIZAÇÃO DOS METAIS NAS MATRIZES SOLIDIFICADAS

Os resultados dos ensaios de solubilização demonstraram que as concentrações de Al e Cr ultrapassaram os limites estipulados pela NBR 10004 (1987), não permitindo a classificação deste material como inerte.

Os demais metais detectados pelo ensaio de solubilização, como: Cu, Fe, Mn e Zn, apresentaram concentrações inferiores aos limites fixados, para todos os traços e idades ensaiadas.

O Fe presente no resíduo bruto foi o metal que apresentou a maior redução no extrato solubilizado do resíduo encapsulado, permitindo classificar as matrizes como inertes. Este comportamento, no entanto, mostrou-se independente dos traços e idades ensaiados. As matrizes indicaram elevada eficiência de fixação do Fe; apresentando, inclusive, 100% de eficiência para as três idades do traço 1:10 (TABELA 7.10-7.12).

As concentrações de Zn presentes em algumas matrizes como: 1:3 - 90 dias (0,09 mg/L e 0,20 mg/L), 1:8 - 7 dias (0,21 mg/L e 0,30 mg/L) e 1:10 - 90 dias (0,15 mg/L e 0,10 mg/L), demonstraram acréscimo deste metal em relação ao resíduo bruto (0,08 mg/L), o que pode indicar uma limitação do processo na fixação do Zn. Contudo, como este comportamento não foi verificado no ensaio de lixiviação, dispensou-se maiores considerações à respeito. O resultado de interesse para esta pesquisa é que todas as matrizes apresentam concentrações de Zn abaixo dos limites condenatórios.

Cu e Mn foram detectados em concentrações menores que os limites estipulados (TABELAS 6.16-6.27).

As concentrações de Al no extrato solubilizado das matrizes não permitem classificá-las como inertes, como já mencionado. Todas as amostras, com exceção do traço 1:8 - 90 dias (alumínio não detectado), apresentaram concentrações superiores ao limite de 0,2 mg/L (TABELAS 6.16-6.27). Todavia, pode-se afirmar que as matrizes apresentaram um bom desempenho na fixação do Al, pois todos os resultados demonstraram minimização desse elemento em relação à concentração presente no extrato solubilizado do resíduo bruto (TABELAS 7.1-7.12).

Acentuando o comportamento observado no ensaio de lixiviação, a eficiência de fixação do Al tende à ser maior para os traços mais ricos em cimento, variando de 89,03% a 100% para o traço 1:3; 75,48% a 100% para o traço 1:5; 62,90 a 100% para o traço 1:8 e de 76,45% a 89,68% para traço 1:10 (TABELAS 7.1-7.12).

A capacidade de fixação desse elemento por um traço determinado, também mantém uma relação direta com a idade da matriz. Desta forma, para o traço 1:5, por exemplo, o Al detectado aos 7 dias (1,89 mg/L), é menor aos 28 dias (1,10 mg/L) e ainda menor aos 90 dias (0,76 mg/L).

Estes resultados sugerem que para traços mais ricos que os estudados, possivelmente poderá ser constatada uma minimização do Al à valores que permitam o enquadramento dessas matrizes na categoria de material inerte.

As concentrações de Cr obtidas para a maioria das amostras demonstraram que, comparativamente aos demais metais, este apresentou a pior fixação pelas matrizes solidificadas (TABELAS 7.1-7.12).

O resultados das amostras de traços 1:5, 1:8 e 1:10 revelaram uma baixa eficiência de fixação, ou melhor, a maioria das concentrações de Cr do extrato solubilizado das matrizes, excedem o correspondente valor do resíduo bruto, independente do traço e da idade (TABELAS 6.19-6.27).

O traço 1:3 no entanto, demonstra uma sensível melhora na fixação desse elemento (TABELAS 7.1-7.3). Aos 90 dias, por exemplo, a minimização do Cr foi suficiente para considerar a matriz, em relação a concentração desse elemento, um material inerte (TABELA 6.18).

Os melhores comportamentos de maneira geral, foram verificados para as matrizes de traço 1:3, sugerindo que para traços mais ricos, possivelmente poderá ser constatada uma minimização do Al e do Cr à valores bem menores. Diante desta possibilidade, foram também moldados corpos-de-prova destinados aos ensaios de solubilização no traço 1:2. Os resultados dos ensaios com essas matrizes, serviram de suporte elucidativo para a comprovação de que existe uma relação direta entre a capacidade de fixação da matriz e sua resistência mecânica. Conforme indicado na TABELA 6.33, as concentrações de Cr e Al foram minimizadas à níveis que permitem classificar este material como inerte.

Verifica-se portanto, que matrizes de traços menores que 1:3 possibilitam o reenquadramento do resíduo, de classe II (não perigoso, não inerte) para classe III (não perigoso, inerte).

Concluindo, os resultados obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização demonstraram que o encapsulamento de areia de fundição com cimento é um processo eficiente para o tratamento das mesmas. Reforçando este comportamento, no ANEXO A, são apresentados os resultados dos ensaios de solubilização realizados com bloquetes de pavimentação empregando areia de fundição de descarte e no ANEXO C, os resultados destes ensaios com tijolos maciços empregando este resíduo.

7.6- SOLUBILIZAÇÃO DO CIMENTO E DA ÁGUA DESTILADA

Uma hipótese que ocorreu para justificar as concentrações de Cr no extrato solubilizado, é a possível presença desse elemento na composição do cimento Portland (CP II-E 32).

O resultado do ensaio de solubilização do cimento bruto (TABELA 6.28) detectou os metais: Al, Cr, Cu, Fe, Mn e Zn, possivelmente, devido a presença de grande porcentagem de escória de alto forno no cimento empregado. Surpreendentemente, as concentrações de Al e Cr apresentaram valores acima dos limites estipulados pela NBR 10004 (1987).

A solubilização dos corpos-de-prova de cimento e água (TABELA 6.28) indicaram apenas a presença de Cr e Zn. O Cr apresentou valores próximos ao limite máximo estabelecido para as concentrações solubilizadas, em algumas amostras este limite foi inclusive superado.

Desta forma, os resultados das análises de cimento, sugerem que as concentrações de Cr e Al presentes nos ensaios dos corpos-de-prova, provém do resíduo incorporado a argamassa e/ou do cimento empregado.

Este resultado deve servir de alerta para trabalhos futuros, sobre a necessidade de uma análise prévia de todos os materiais empregados na confecção dos corpos-de-prova, visando reduzir ao máximo interferências externas ao processo. O reconhecimento inicial do cimento empregado, por exemplo, possibilitaria a sua substituição por um cimento mais adequado à aplicação em trabalhos dessa natureza.

A análise da solubilização da água destilada empregada nos ensaios de lixiviação e solubilização das matrizes solidificadas não detectaram a presença de nenhum metal (TABELA 6.29), não se caracterizando como uma forma de contaminação para o processo.

7.7- SOLUBILIZAÇÃO MÚLTIPLA

Com o intuito de avaliar a solubilidade do resíduo encapsulado a longo prazo, foi inserido um procedimento não normalizado, referido como solubilização múltipla, sendo assim designado por combinar múltiplas extrações dos extratos solubilizados das matrizes solidificadas (TABELAS 6.30-6.32).

Os resultados obtidos com a primeira extração, para todos os traços ensaiados, mostraram que as matrizes apresentaram concentrações dos metais Al e Cr acima do limite permitido, como já esperado. Os resultados analíticos das extrações seguintes revelaram que a quantidade de Cr solubilizadas das amostras reduziu-se à níveis abaixo desse limite. Desta forma, baseado nos resultados no teste de múltipla solubilização, o Al é o único contaminante que não permite o enquadramento da matriz solidificada na categoria de material inerte.

7.8- DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

A difratometria de raios-X é um ensaio qualitativo que permite a identificação das principais espécies químicas constituintes da amostra analisada, sem, contudo, determinar com exatidão a proporção entre elas.

Os resultados dos ensaios permitiram selecionar os compostos formados pelas espécies químicas de interesse no estudo, no caso: Al, Cr, Cu, Fe, Mn e Zn. A identificação desses elementos foi apresentada nos difratogramas resultantes dessa seleção (FIGURAS 6.6-6.9), demonstrando que tais espécies químicas encontram-se retidas, encapsuladas, no retículo cristalino da referida matriz.

7.9- ASPECTOS ECONÔMICOS

Embora não tenha sido o objetivo deste trabalho fazer uma análise econômica profunda da técnica de encapsulamento estudada, uma indicação dos custos envolvidos no processo pode auxiliar na avaliação da viabilidade de uma eventual aplicação em escala comercial da mesma.

Admitindo-se a hipótese da instalação de uma unidade de solidificação que utilize diretamente os resultados da pesquisa e na qual as matrizes solidificadas sejam comercializadas como peças para construção civil, foram estimados os custos de fabricação de tijolos maciços e blocos vazados de concreto simples, confeccionados com argamassas de cimento Portland e areia de fundição de descarte (MAZARIEGOS, 1995).

A análise dos custos envolvidos deve computar, por exemplo: as despesas relacionadas com equipamentos de mistura, instalações e materiais para cura das peças, energia, mão-de-obra, encargos sociais, entre outras considerações.

A nível desta estimativa, considerou-se apenas o material utilizado (cimento). O preço do cimento utilizado na composição do custo foi de R\$6,50 para um saco de 50 kg.²

² valor de câmbio do dólar americano em relação à moeda corrente (real): US\$ 1,00 = R\$ 1,07

Os traços considerados para análise, foram apenas os que indicaram os melhores comportamentos de resistência, aliada à condição de minimização dos metais pesados presentes no resíduo. Merece ser ressaltado que vinculado à questão econômica, deve estar a noção do prejuízo ambiental causado pela disposição inadequada deste resíduo.

TABELA 7.13- Estimativa do preço de mercado de tijolos maciços com areia de fundição de descarte

traço	custo cimento / unidade (R\$)
1:2	0,08
1:3	0,06
1:5	0,05

Para melhor analisar a viabilidade econômica de uma eventual aplicação desse processo, são apresentados no quadro à seguir, preços de mercado desses materiais.

TABELA 7.14- Valor de mercado de tijolos cerâmicos

tijolo maciço cerâmico	custo / unidade (R\$)
Cerâmica Ponte Alta (Barra Bonita - SP)	0,07
Cerâmica 3G (Porto Ferreira - SP)	0,08

8- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização, demonstraram que o encapsulamento (solidificação) de areia de fundição com cimento é um processo eficiente para minimização ou eliminação dos metais pesados presentes neste resíduo, o que, em essência, era o objetivo fundamental dos experimentos. Os valores de resistência mecânica apresentados pelas matrizes foram animadores, viabilizando a continuidade de estudos visando o emprego da areia de fundição em peças de cimento para construção civil. Para elucidar esta pesquisa, foi realizado um estudo da aplicação da areia de fundição na fabricação de blocos de concreto para pavimentação, apresentado no ANEXO A.

De uma maneira geral, os resultados descritos nos capítulos anteriores, fornecem um quadro das principais características técnicas do material encapsulado, indicam tendências, apresentam problemas relacionados a manipulação dos materiais e principalmente, apontam caminhos a serem seguidos em novos experimentos do gênero.

À seguir, são listadas as principais conclusões e tendências observadas nos experimentos.

Conclusões

- Os resultados dos ensaios de resistência mecânica dos corpos-de-prova confeccionados com argamassas de cimento e areia de fundição, foram proporcionais aos traços e idades das matrizes. Assim, quanto mais rico o traço e maior a idade da matriz, melhor a sua resistência. A principal observação, refere-se

ao fato das matrizes apresentarem condições de resistência muitas vezes superiores a elementos empregados na construção civil.

- Em nenhuma das misturas de resíduo e cimento ensaiadas, as concentrações de metais na lixiviação ultrapassaram os limites estipulados pela NBR 10004 (1987). Com exceção da concentração de Cr de algumas amostras, todas as matrizes apresentaram uma minimização da concentração dos íons metálicos em relação ao resíduo bruto (areia de fundição de descarte).
- Os resultados dos ensaios de solubilização, demonstraram que as concentrações de Al e Cr ultrapassaram os limites estipulados pela NBR 10004 (1987), não permitindo a classificação deste material como inerte. Os demais metais detectados pelo ensaio, como: Cu, Fe, Mn e Zn, apresentaram para todos os traços e idades ensaiadas, concentrações inferiores aos limites fixados.
- Entre os metais que apresentaram as maiores concentrações no resíduo bruto, o Fe foi o elemento mais eficientemente fixado pelas matrizes. O Al apresentou para a maioria das amostras solubilizadas, concentrações superiores ao limite estipulado. Todavia, pode-se afirmar que as matrizes apresentaram um bom desempenho na fixação desse elemento, pois todos os resultados demonstraram sua diminuição em relação a concentração presente no resíduo bruto. Para a maioria das amostras, as concentrações de Cr no extrato solubilizado excederam o valor encontrado no resíduo bruto, demonstrando que, comparativamente aos demais metais, o Cr apresentou a pior fixação pelas matrizes solidificadas.
- Os ensaios realizados com o cimento empregado na pesquisa, detectaram a presença de Al e Cr em concentrações acima dos limites estipulados, sugerindo que as concentrações finais desses elementos nas matrizes ensaiadas, provém do resíduo incorporado à argamassa e/ou do cimento empregado.
- Os ensaios de solubilização múltipla das matrizes solidificadas, revelaram nos resultados analíticos das sucessivas extrações, que a quantidade de Cr solubilizada das amostras reduziu-se à níveis abaixo dos limites estipulados pela NBR 10004

(1987). Desta forma, baseados nos resultados do teste de múltipla solubilização, o Al é o único contaminante que não permite o enquadramento da matriz solidificada na categoria de material inerte.

- De uma maneira geral, as matrizes solidificadas que apresentaram maiores resistências mecânicas, demonstraram também melhor eficiência na fixação dos metais. Desta forma, os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização das matrizes de traço 1:3 (90 dias) e das matrizes de traço 1:2, permitiram enquadrá-las, segundo NBR 10004 (1987), na categoria dos resíduos não perigosos - inertes (classe III).
- Os resultados da Difractometria de raios-X, permitiram a identificação dos compostos químicos formados pelos elementos de interesse: Al, Cr, Cu, Fe, Mn e Zn. Os difratogramas indicaram portanto, a ocorrência de encapsulamento químico, proporcionado pela incorporação dos elementos constituintes do resíduo à estrutura cristalina da matriz
- A comparação entre os custos estimados para produção de tijolos maciços empregando areia de fundição e os custos praticados pelas empresas consultadas para o tijolo cerâmico, permitem sugerir que o investimento na produção de materiais empregando este resíduo é economicamente viável, e principalmente, confirma uma tendência apontada como uma das principais vantagens da técnica de encapsulamento com cimento: uma alternativa de uso fácil e de custo razoável.

Recomendações

- Conforme evidenciado, o Al e o Cr foram os metais de mais baixa fixação pelas matrizes de areia de fundição de descarte. Isto sugere que, para resíduos com concentrações pronunciadas de Al e Cr, a técnica de encapsulamento com cimento não seja tão eficiente e recomendável como para outros materiais.

- Mesmo apresentando boa eficiência na fixação dos metais pesados, as matrizes enquadradas na classe II - resíduos não perigosos mas não inertes (NBR 10004, 1987), ainda exigem cuidados especiais na sua disposição. Assim, associada a uma instalação de encapsulamento das areias de fundição de descarte, com as características das utilizadas nos experimentos, deve ser prevista uma área adequadamente preparada para disposição das matrizes solidificadas.
- Para os novos experimentos que venham a ser executados sobre a técnica de encapsulamento de resíduos, sugere-se um reconhecimento mais profundo do mecanismo de retenção dos elementos pela matriz, através da realização de ensaios como: porosimetria de Hg, porosimetria ao N₂, e outros.
- Diante da viabilidade de emprego da areia de fundição de descarte na construção civil, recomenda-se um estudo que envolva a melhoria do comportamento do resíduo como agregado. Sugere-se por exemplo, a realização de distintas composições empregando areia de fundição de descarte e brita de diferentes granulometrias, procurando aumentar a capacidade suporte do material produzido. Outra proposta, é que novos estudos considerem uma análise de durabilidade das matrizes solidificadas. E ainda, a possibilidade de emprego dos vários traços cimento-resíduo em local sem umidade, para assentamento de alvenaria, por exemplo.
- As concentrações de metais, encontradas no cimento utilizado nesta pesquisa, alerta para a necessidade de um reconhecimento prévio da matéria-prima empregada no processo. Para trabalhos posteriores, fica a sugestão de estudos empregando o resíduo e outro tipo de cimento, como também, uma pesquisa que se destine à caracterização dos vários tipos de cimentos comercializados no mercado, diante da possibilidade destes se constituírem numa fonte poluidora.

ANEXO A

A- FABRICAÇÃO DE BLOCOS PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO EMPREGANDO AREIA DE FUNDIÇÃO DE DESCARTE

Os resultados dos ensaios mecânicos das argamassas de cimento-resíduo, indicaram a possibilidade do reaproveitamento da areia de fundição de descarte em peças de cimento para uso na construção civil.

O emprego da areia de fundição de descarte na confecção de tijolos maciços (MAZARIEGOS, 1995), evidenciou a viabilidade da fabricação desses elementos, acentuando a potencialidade de reuso do resíduo.

Objetivando o acréscimo de informações sobre a aplicação da areia de fundição de descarte na construção civil, nesta pesquisa foram produzidos bloquetes para pavimentação empregando esse resíduo como agregado (FIGURA A.1).

A.1- METODOLOGIA

Os materiais empregados na produção dos bloquetes para pavimentação foram:

Materiais	Bloquete sem resíduo (padrão)	Bloquete com areia de fundição
Cimento Portland	CP II E-32	CP II E-32
Agregados	mistura de areia grossa e brita 1	mistura de areia de fundição de descarte e brita 1

A fabricação destes elementos foi realizada pelos funcionários da Prefeitura do Campus da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, que na prática, determinam o traço do concreto pelo método da mistura experimental (NBR 9781, 1987). É um método simplificado e, como tal, apresenta menor precisão, compensada por uma necessária superdosagem do cimento com evidente aumento do custo do concreto.

A relação agregado/cimento e a proporção da mistura brita/areia de fundição foram idênticas às empregadas para produção de bloquetes convencionalmente produzidos (padrão).

A padronização para fabricação desses materiais fixa o traço 1:2 para a relação agregado/cimento e proporção brita/areia em 1:1. A relação água/cimento é feita empiricamente: durante a mistura adiciona-se água aos poucos, até que o concreto, após ser apertado com as mãos, mantenha a forma.

A medida dos materiais para a mistura foi realizada com o auxílio de recipientes com dimensões padronizadas, fazendo-se então a medida em volume.

Os materiais foram misturados manualmente com uma enxada, até a obtenção de um concreto homogêneo, caracterizado visualmente pela uniformidade de aspecto.

O concreto foi lançado nos moldes e adensado com um vibrador. Para o acabamento utilizou-se um pá desempenadeira.

Após a moldagem, as peças foram colocadas juntamente com as bandejas em local protegido da ação do sol e do vento. Após algumas horas, foi aspergido água sobre elas, de modo a manter a umidade adequada.

No dia seguinte ao da produção, as peças foram removidas das bandejas e colocadas na câmara úmida onde permaneceram até a data de ensaio. As peças foram ensaiadas aos 28 e 90 dias de idade, recebendo anteriormente um capeamento da superfície com argamassa de cimento.

Além da verificação das condições exigíveis para a aceitação das peças empregando areia de fundição de descarte, esta pesquisa proporcionou uma comparação entre estas peças e os bloquetes convencionalmente produzidos no campus da EESC, fabricados no mesmo dia e nas mesmas condições.

A.1.1- Ensaio de resistência mecânica

A resistência à compressão (f_{pk}) é a resistência apresentada pela peça em uma determinada idade quando ensaiada com carregamento parcial de sua área superficial, conforme NBR 9780 (1987), Peças de concreto para pavimentação - Determinação da resistência à compressão.

- Valor característico da resistência à compressão

Admite-se que a resistência à compressão obedeça a distribuição de "Student", sendo o valor característico estimado pela expressão:

$$f_{pk} = f_p - t \cdot s$$

onde:

f_{pk} = resistência característica à compressão, em MPa;

f_p = resistência média das peças ensaiadas segundo NBR 9780 (1987), em MPa;

s = desvio padrão da amostra, em MPa;

t = coeficiente de “Student”, fornecido em função do tamanho da amostra.

A.1.2- Ensaio de abrasão Los Angeles

O único procedimento normalizado que se destina à verificação das condições exigidas para a aceitação dos bloquetes como peças para pavimentação é o ensaio de resistência mecânica desses elementos.

Nesta pesquisa, a determinação da Abrasão Los Angeles desse material, visa maiores esclarecimentos à respeito do comportamento ou influência da areia de fundição de descarte empregada como matéria-prima na confecção dos bloquetes. Não emprega, contudo, estipulações normativas próprias, baseando-se em procedimentos empregados para outros materiais.

O procedimento adotado seguiu o método da NBR 6465 (1984), Agregados - Determinação da abrasão “Los Angeles”.

- Preparação do material

- Os bloquetes após o ensaio de resistência mecânica passaram por uma britagem manual com marretas.
- Em seguida, o material resultante foi peneirado no laboratório, obtendo-se diversas frações das graduações, que foram acondicionadas em bandejas.
- Escolheu-se a graduação (ou as graduações) constante da Tabela II fixada pela NBR 6465 (1984). As frações da graduação escolhida foram separadas e lavadas, colocando as mesmas sobre a peneira que define o limite inferior das respectivas frações, utilizando-se água corrente.
- Transferiu-se, novamente, as frações lavadas em bandejas, que foram colocadas em estufa para secagem do material.

- A graduação (ou graduações) escolhida foi composta, pesando as frações secas nas quantidades especificadas (NBR 6465, 1984).

Esse procedimento foi adotado para obtenção das amostras dos bloquetes com areia de fundição e dos bloquetes convencionais.

- Processo

- As amostras foram enviadas ao Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.
- Colocou-se no tambor da máquina de Abrasão Los Angeles (devidamente limpo), a carga abrasiva (esferas) obedecendo as quantidades fixadas e em seguida, a amostra preparada.
- O tambor ficou girando até completar 500 revoluções.
- Todo material contido no tambor foi despejado numa bandeja, e retirou-se as esferas de aço, limpando-as com o auxílio de uma escova, de maneira que os finos aderentes caíssem na bandeja.
- O agregado contido na bandeja foi peneirado, com emprego da peneira de 1,68 mm de abertura e a fração que passou foi rejeitada.
- O agregado retido foi lavado na peneira de 1,68 mm e em seguida, transferido para uma bandeja, que foi levada para uma estufa de 105-110^o C, até constância de peso.
- No dia seguinte, a bandeja foi retirada da estufa e pesou-se o agregado nela contido (massa m').

A.1.3- Ensaio de lixiviação e solubilização dos bloquetes com areia de fundição

Além da indicação da capacidade suporte dos bloquetes produzidos com areia de fundição de descarte, foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização das amostras desses bloquetes, cujo intuito é verificar o comprometimento ambiental decorrente do emprego desses elementos.

Durante a produção dos bloquetes de pavimentação com areia de fundição foram moldados 2 corpos-de-prova de ϕ 3,3 cm x 7,1 cm, destinados ao ensaio de lixiviação.

Os fragmentos dos bloquetes após o ensaio de resistência mecânica, serviram de amostra para o ensaio de solubilização.

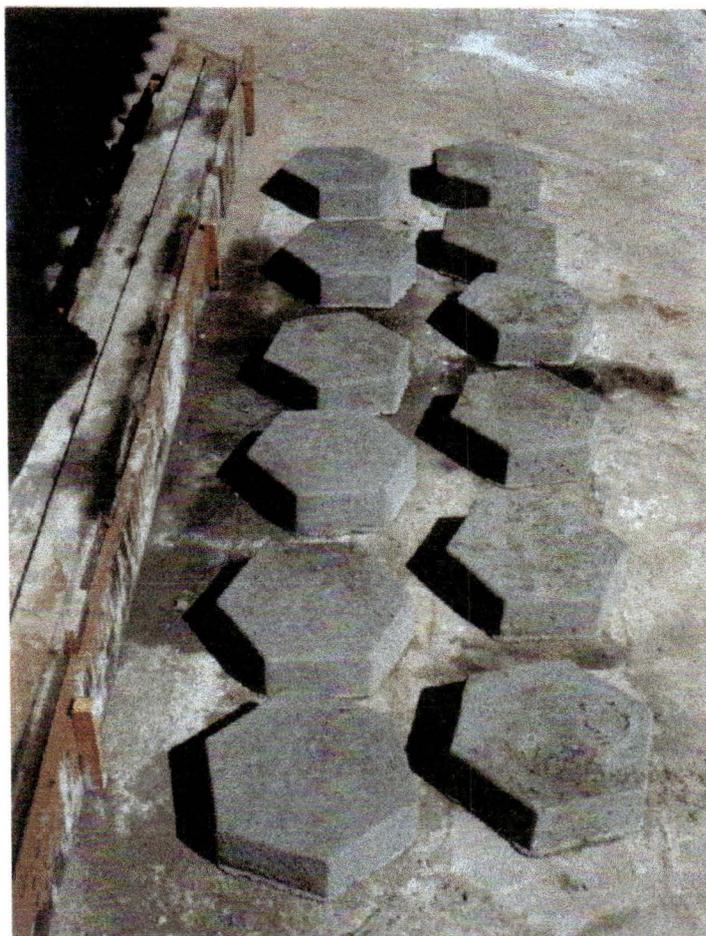


FIGURA A.1- Blocos pré-moldados de concreto para pavimentação

A.2- RESULTADOS

A.2.1- Ensaio de resistência à compressão

TABELA A.1- Resultado do ensaio de resistência mecânica dos bloquetes (28 dias)

amostra	Resistência (MPa)	
	sem areia de fundição	com areia de fundição
1	40,6	24,2
2	39,8	25,9
3	42,9	24,6
f_p	41,1	24,9
s	1,31	0,73
t	1,00	1,00
f_{pk}	39,8	24,2

TABELA A.2- Resultado do ensaio de resistência mecânica dos bloquetes (90 dias)

amostra	Resistência (MPa)	
	sem areia de fundição	com areia de fundição
1	44,8	30,3
2	43,5	29,6
3	48,7	29,2
f_p	45,7	29,7
s	2,21	0,45
t	1,00	1,00
f_{pk}	43,5	29,3

A NBR 9781 (1987) estipula que a resistência característica à compressão deve ser maior ou igual a 30 MPa, para solicitações normais de tráfego.

A.2.2- Ensaio de abrasão Los Angeles

TABELA A.3- Preparação da amostra - bloquete com areia de fundição

peneiras-abertura (mm)		massas da amostra (g)													
material passa	material retido	grad.*A		grad.B		grad.C		grad.D		grad.E		grad.F		grad.G	
		nec.	obt.												
76,2	63,5	-	-	-	-	-	-	-	-	2500 ± 50		-	-	-	-
63,5	50,8	-	-	-	-	-	-	-	-	2500 ± 50		-	-	-	-
50,8	38,1	-	-	-	-	-	-	-	-	5000 ±100		5000 ±100		-	-
38,1	25,4	1250 ±25		-	-	-	-	-	-	-	-	5000 ±100		5000 ±100	
25,4	19,1	1250 ±25		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5000 ±100	
19,1	12,7	1250 ±25		2500 ± 50		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12,7	9,52	1250 ±25		2500 ± 50		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9,52	6,35	-	-	-	-	250 0 ± 50		-	-	-	-	-	-	-	-
6,35	4,76	-	-	-	-	250 0 ± 50		-	-	-	-	-	-	-	-
4,76	2,38	-	-	-	-	-	-	500 0 ±10 0		-	-	-	-	-	-
massa total		5000 ±10 0	m_A	5000 ±100	m_B	500 0 ±10 0	m_C	500 0 ±10 0	m_D	10000 ±200	m_E	10000 ±200	m_F	10000 ±200	m_G
carga abrasiva nº de esferas		12		11		8		6		12		12		12	

fonte: NBR 6465 (1984).

*grad, graduação estabelecida pela NBR 6465 (1984).

TABELA A.4- Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles - bloquete com areia de fundição

Grad. B	massa da amostra seca, colocada na máquina	$m_B = 5000 \text{ g}$
	massa da amostra lavada e seca, após o ensaio	$m'_B = 3043 \text{ g}$
	Abrasão Los Angeles - $A_A = \frac{m_A - m'_A}{m_A} \cdot 100 = \frac{5000 - 3043}{5000} \cdot 100 = 39\%$	

TABELA A.5- Preparação da amostra - bloquete sem areia de fundição (padrão)

peneiras-abertura (mm)		massas da amostra (g)													
material passa	material retido	grad.A		grad.B		grad.C		grad.D		grad.E		grad.F		grad.G	
		nec.	obt.												
76,2	63,5	-	-	-	-	-	-	-	-	2500 ± 50		-	-	-	-
63,5	50,8	-	-	-	-	-	-	-	-	2500 ± 50		-	-	-	-
50,8	38,1	-	-	-	-	-	-	-	-	5000 ±100		5000 ±100		-	-
38,1	25,4	1250 ±25		-	-	-	-	-	-	-		5000 ±100		5000 ±100	
25,4	19,1	1250 ±25		-	-	-	-	-	-	-		-		5000 ±100	
19,1	12,7	1250 ±25		2500 ± 50		-	-	-	-	-		-		-	-
12,7	9,52	1250 ±25		2500 ± 50		-	-	-	-	-		-		-	-
9,52	6,35	-	-	-	-	250 0 ± 50		-	-	-		-		-	-
6,35	4,76	-	-	-	-	250 0 ± 50		-	-	-		-		-	-
4,76	2,38	-	-	-	-	-	-	500 0 ±10 0		-		-		-	-
massa total		5000 ±10 0	m_A	5000 ±100	m_B	500 0 ±10 0	m_C	500 0 ±10 0	m_D	10000 ±200	m_E	10000 ±200	m_F	10000 ±200	m_G
carga abrasiva nº de esferas		12		11		8		6		12		12		12	

TABELA A.6- Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles - bloquete sem areia de fundição (padrão)

Grad. B	massa da amostra seca, colocada na máquina	$m_A = 5000$ g
	massa da amostra lavada e seca, após o ensaio	$m'_A = 2965$ g
	Abrasão Los Angeles - $A_A = \frac{m_A - m'_A}{m_A} \cdot 100 = \frac{5000 - 2965}{5000} \cdot 100 = 40,7\%$	

A.2.3- Ensaio de lixiviação e solubilização

TABELA A.7- Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização dos bloquetes (90 dias)

elemento	Lixiviação (mg/L)		Lixiviação L.M.(mg/L)	Solubilização (mg/L)		Solubilização L.M.(mg/L)
	amostra 1	amostra 2		amostra 1	amostra 2	
Al	nd	-	-	0,2	-	0,2
Cd	nd	nd	0,5	nd	nd	0,005
Cr	nd	0,05	5,0	nd	nd	0,05
Cu	0,01	0,02	-	nd	nd	1,0
Fe	nd	nd	-	nd	nd	0,3
Mn	nd	nd	-	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	-	nd	nd	-
Pb	nd	nd	5,0	nd	nd	0,05
Zn	0,03	0,01	-	0,07	0,10	5,0

A.3- CONCLUSÃO

Os ensaios de resistência mecânica dos bloquetes empregando areia de fundição de descarte, apresentaram valores menores que os bloquetes que não utilizaram este resíduo. Contudo, a resistência apresentada aos 90 dias, foi próxima ao limite estipulado pela NBR 9781 (1987) e demonstrou crescimento em função da idade dos bloquetes, sugerindo a possibilidade de emprego desses elementos em situações de tráfego normal.

A medida do desgaste dos agregados produzidos com os bloquetes, através do ensaio de abrasão Los Angeles, permite concluir que teoricamente os materiais possuem o mesmo comportamento. A areia de fundição por tanto, não restringe a possibilidade de emprego desses elementos em termos do desgaste que apresentam.

Quanto à possibilidade de comprometimento ambiental decorrente da disposição desses elementos, os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização demonstraram que os bloquetes produzidos empregando areia de fundição de descarte foram classificados como inertes.

ANEXO B

B- MOLDAGEM DE CORPOS-DE-PROVA EMPREGANDO AREIA DE GRANULOMETRIA SIMILAR À AREIA DE FUNDIÇÃO DE DESCARTE

Visando a complementação deste trabalho, empregou-se areia de uso comum na construção civil para a composição de um material de granulometria similar à areia de fundição de descarte.

Para a preparação do material, a areia foi peneirada na mesma sequência de peneiras do ensaio de granulometria da areia de fundição; as frações das graduações obtidas foram reservadas e quando em quantidades suficientes, foram misturadas nas proporções granulométricas obtidas para a areia de fundição.

Adotando o mesmo procedimento empregado na produção das argamassas de cimento-resíduo, foram manipuladas misturas nos traços 1:3, 1:5, 1:8 e 1:10 empregando este material (areia de construção composta).

Estas misturas apresentaram baixa trabalhabilidade, marcada pela segregação dos materiais e além disso, as resistências foram menores do que as matrizes que empregaram areia de fundição (TABELA A.2).

TABELA B.1- Resistência mecânica (média) das matrizes de areia de fundição

traço	Resistência à compressão (MPa)		
	7 dias	28 dias	90 dias
1:3	11,50	16,51	21,27
1:5	5,79	8,00	12,57
1:8	2,01	4,37	5,95
1:10	1,85	3,59	4,89

TABELA B.2- Resistência mecânica (média) das matrizes de areia composta

traço	Resistência à compressão (MPa)		
	7 dias	28 dias	90 dias
1:3	10,61	15,82	20,76
1:5	4,80	7,17	12,31
1:8	1,73	3,57	3,96
1:10	1,55	2,06	2,65

Uma análise padronizada desses resultados, deveria prever ensaios para identificação de materiais deletérios presentes na areia que foi composta, ou então, esta composição deveria partir de uma areia normalizada. Por hora, esses resultados serviram apenas para reforçar a possibilidade de emprego do resíduo como agregado, e sugerir o melhoramento da granulometria da areia de fundição, através de estudos de composições entre diferentes agregados , resíduo e cimento, visando a obtenção de matrizes com melhores resistências e possivelmente de melhor eficiência na fixação dos metais pesados, não implicando necessariamente em aumento no consumo de cimento.

ANEXO C

**C- ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO DE TIJOLOS MACIÇOS
EMPREGANDO AREIA DE FUNDIÇÃO DE DESCARTE**

TABELA C.1- Ensaio de solubilização de tijolos empregando areia fundição de descarte

elemento	Solubilização - tijolos (mg/L)				Solubilização L.M.* (mg/L)
	traço 1:3	traço 1:5	traço 1:6	traço 1:8	
Al	nd	nd	0,08	nd	0,2
Cd	nd	nd	nd	nd	0,005
Cr	0,05	0,08	0,10	0,11	0,05
Cu	nd	nd	nd	nd	1,0
Fe	nd	nd	nd	nd	0,3
Mn	nd	nd	nd	nd	0,1
Ni	nd	nd	nd	nd	-
Pb	nd	nd	nd	nd	0,05
Zn	nd	nd	nd	nd	5,0

* L.M. - Limite Máximo estipulado pela NBR 10004 (1987).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, A.P.H.A. (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Boston, Mass, 18^a ed.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1982). *NBR 7251 - Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1983). *NBR 7211 - Agregado para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). *NBR 6465 - Determinação da abrasão "Los Angeles"*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 9777 - Determinação da absorção de água em agregados miúdos*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 7217 - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 9776 - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 7219 - Determinação do teor de materiais pulverulentos*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 9935 - Agregados - Terminologia*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1993). *NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). *NBR 7223 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1994). *NBR 5739 - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 9781 - Peças de concreto para pavimentação*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 9780 - Peças de concreto para pavimentação - Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 10005 - Lixiviação de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 10006 - Solubilização de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 10007 - Amostragem de Resíduos*. Rio de Janeiro.
- BAUER, L.A. FALCÃO. (1985). *Materiais de construção*. Rio de Janeiro, LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., vol.1, 3^a ed.
- BENTONIT UNIÃO NORDESTE. (1992). *Bentonita sódica - especificação, São Paulo*.
- BROSCH, C.D.; RÉ, V.L. (1965). *Areias de fundição e materiais de moldagem*. São Paulo, IPT, Boletim nº 54.
- CETESB. (1985). *Resíduos sólidos industriais*. São Paulo. CETESB/ASCETESB.
- CHAMIE, S.L. (1993) *Encapsulamento de resíduos de lamas galvânicas através de Solidificação em matriz de cimento*. São Paulo. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- CLÁUDIO, J.R. (1987). *Resíduos sólidos perigosos. Solidificação de lamas tóxicas com cimentos*. São Paulo. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- COCKE, D. et al. (1989). A model for lead retardation of cement setting. *Cement and Concrete Research*, v.19, n1, jan., p.156-159.
- CORDEIRO, J.S. (1993). *O problema dos lodos gerados nos decantadores em estações de tratamento de água*. São Carlos. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DAMASCENO, S. (1996). *Remoção de metais pesados em sistemas de tratamento de esgotos sanitários por processo de lodos ativados e por reator compartimentado anaeróbio*. São Carlos. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DANIALI, S.(1990). Solidification/stabilization of heavy metals in latex modified Portland cement matrices. *Journal of Hazardous Materials*, v.24, n 2-3, sep., p.225-230..
- HALL, S.K. (1989). Biological monitoring of metal exposure. *Pollution engineerin*, v.21, n 1, jan., p.128-131.

- KONDIC, V. (1973). *Princípios Metalúrgicos de Fundição*. São Paulo, Polígono.
- LEE, C. et al. (1994). A long-term leachability study of solidified wastes by the multiple toxicity characteristic leaching procedure. *Journal of Hazardous Materials*, v.38, n 1, jul. , p.65-74.
- MAZARIEGOS PABLOS, J. (1995). *Utilização do resíduo sólido gerado pelo descarte das areias de fundição aglomeradas com argila no setor da construção civil*. São Carlos. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. (1994). *Concreto - estrutura, propriedade e materiais*. São Paulo, Pini.
- MERRITT, S.D. et al. (1993). Applications of soil and cement chemistry to stabilization/solidification. *Transportation Research Record*, n.1424, p.1-7.
- PEREIRA, M.L. et al. (1995). Chromium accumulation and ultrastructural changes in the mouse liver caused by stainless steel corrosion products. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, v.6, n.1, jan., p.523-527.
- PETRUCCI, E.G.R. (1993). *Materiais de construção*. São Paulo, Globo, 9ª ed.
- PINTO, T.P. (1986). *Utilização de resíduos de construção: estudo do uso de argamassas*. São Carlos. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- POLLARD, S.J.T. et al. (1991). Organic compounds in the cement-based stabilisation/solidification of hazardous mixed wastes. Mechanistic and process considerations. *Journal of Hazardous Materials*, v.28, n 3, nov., p.313-327.
- POON, C.S.; CLARCK, A.I.; PERRY, R. (1986). Permeability study on the cement based solidification process for the disposal of hazardous wastes. *Cement and Concrete Research*, v.16, p.161-172.
- SIEGEL, M. (1979). *Fundição*. Associação Brasileira de Metais (ABM).
- TRACANA, R.B. et al. (1995). Stainless steel corrosion products cause alterations on mouse spleen cellular populations. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, v.6, n.1, jan., p.56-61.
- WEITZMAN, L. (1990). Factors for selecting appropriate solidification/stabilization methods. *Journal of Hazardous Materials*, v.24, n.2-3, sep., p.157-168.
- YANG, Gordon C.C. et al. (1994). Feasibility of using a mixture of an electroplating sludge and a calcium carbonate sludge as binder for sludge solidification. *Journal of Hazardous Materials*, v.36, n 1, jan., p.81-88.