Dissertação de Mestrado

RECICLANDO CINZAS

Estudo de viabilidade para produção de blocos para a construção civil a partir da cinza volante residual de um reator de leito fluidizado.

Autora:
Josiane Ramos Nogueira
Orientador:
Eduvaldo Paulo Sichieri

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
LINHA DE PESQUISA EM ARQUITETURA URBANISMO E TECNOLOGIA

JOSIANE RAMOS NOGUEIRA

(Versão corrigida)

**RECICLANDO CINZAS: ESTUDO DE VIABILIDADE PARA PRODUÇÃO DE
BLOCOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DA CINZA VOLANTE
RESIDUAL DE UM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO.**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Arquitetura e Urbanismo da USP de São
Carlos, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia.

Orientador:

Prof. Titular **EDUVALDO PAULO SICHIERI**

Apoio:

Fundação de Amparo à Pesquisa e ao
Desenvolvimento Científico do Maranhão –
FAPEMA.

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado
de São Paulo – FAPESP.

SÃO CARLOS
2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

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

N778r	<p>Nogueira, Josiane Ramos</p> <p>Reciclando cinzas : estudo de viabilidade para produção de blocos para a construção civil a partir da cinza volante residual de um reator de leito fluidizado / Josiane Ramos Nogueira ; orientador Eduvaldo Paulo Sichieri. -- São Carlos, 2011.</p> <p>Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em Arquitetura Urbanismo e Tecnologia) -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.</p> <p>1. Resíduo sólido industrial. 2. Estabilização/solidificação. 3. Reciclagem. 4. Materiais de construção civil. 5. Sustentabilidade. I. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Arquiteto Urbanista **JOSIANE RAMOS NOGUEIRA**

Título da dissertação: **Reciclando cinzas: estudo de viabilidade para produção de blocos para a construção civil a partir da cinza volante residual de um reator de leito fluidizado.**

Data da defesa: 07/10/2011:

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Eduvaldo Paulo Sichieri (Orientador)**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo/USP)

Prof. Dr. **Javier Mazariegos Pablos**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo/USP)

Prof. Titular **Almir Sales**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Resultado:

APROVADA

Aprovada

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo:
Prof. Titular **Renato Luiz Sobral Anelli**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

Dedico este trabalho, fruto de muito aprendizado, aos meus pais Joana Ramos e José Maria Nogueira. Pessoas amadas, que sempre me deram amor, carinho e oportunidades.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Eduvaldo Sichieri, agradeço pela orientação e novos ensinamentos na minha trajetória de pesquisadora. Agradeço também por todas as contribuições à pesquisa e principalmente por sua amizade. Ao Prof. Javier Pablos, agradeço pela generosa co-orientação e por todo o envolvimento durante os ensaios da pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Construção civil: Paulão, Sérgio e Paulo, e ao aluno de iniciação científica: Leonardo, agradeço por todo apoio e paciência na execução dos ensaios, sem os quais não seria possível chegar às conclusões desse trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Saneamento, Natália, Sabrina, Júlio e Paulo, agradeço pela acolhida e disposição em ensinar técnicas e ensaios indispensáveis para o sucesso da pesquisa. Ao Laboratório de Cristalografia do IFSC, agradecimentos ao Augusto pelo auxílio dado na análise dos materiais. Ao professor Murilo Innocentini agradeço sua generosa contribuição ao ceder seus conhecimentos sobre ensaios específicos.

Fico grata por todo conhecimento adquirido nas aulas da pós-graduação do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, pois pude desenvolver meu pensamento crítico e ter acesso a novos conhecimentos que serão úteis não só na minha vida acadêmica, mas em toda minha trajetória de vida. Fico especialmente agradecida aos professores que fizeram parte da minha banca de qualificação: Valdir Schalch e Osny Pelegrino, por sua valiosa contribuição para o direcionamento da pesquisa. E também aos professores da banca de defesa: Javier Pablos e Almir Sales pela atenção dada ao trabalho e por contribuírem para um melhor fechamento da pesquisa.

Aos funcionários da arquitetura, Marcelinho, Geraldo, Caio, Sérgio, Fátima, Paulo e Osvaldo, agradeço pelo apoio administrativo e pela convivência durante esses anos.

Agradecimentos especiais aos amigos que fiz na cidade de São Carlos: Marieli, Rérisson, Monica, Rodrigo, Cristiane, Débora, Carolina, Gerusa, Lorenza, Rafael, Mayara, Simone, Juliana, sem os quais a minha permanência nessa cidade seria quase impossível. Essas amigas e tantas outras foram muito importantes para o meu crescimento pessoal. Agradeço pelo companheirismo, carinho, apoio, paciência e amizade.

À minha família, minha mãe Joana e meu pai José Maria, agradeço pelo amor incondicional, pelas oportunidades, pelo apoio às minhas escolhas e por acreditarem sempre que vou atingir meus objetivos. Agradeço também a Wagner por todo amor, dedicação, motivação e paciência durante todos esses anos.

Por fim, agradeço à FAPEMA (Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico do Maranhão) pelo apoio financeiro durante o primeiro ano do mestrado, e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo) pelo apoio financeiro durante o segundo ano de mestrado. Com esse apoio foi possível permanecer em dedicação exclusiva à pesquisa, o que foi de grande importância para atingir aos objetivos da pesquisa.

SUMÁRIO

Resumo	13
Abstract	15
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	17
1.1. <i>Justificativa</i>	20
1.2. <i>Objetivos</i>	22
1.2.1 Objetivo Geral	22
1.2.2 Objetivos Específicos	22
1.3. <i>Estrutura da dissertação</i>	22
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. CONSTRUÇÃO CIVIL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	27
2.1.1 Conceitos	28
2.1.2 Sustentabilidade na construção civil e na arquitetura	28
2.1.3 Materiais e produtos sustentáveis.....	30
2.2. CIMENTO PORTLAND.....	31
2.2.1 Produção	31
2.2.2 Composição química do cimento.....	33
2.2.3 Tipos de cimento.....	34
2.2.4 Argamassas	36
2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS	36
2.3.1 Resíduos sólidos industriais	39
2.3.2 Políticas normativas.....	42
2.3.3 Impactos	43
2.3.4 Reaproveitamento de resíduos sólidos	44
2.4. CINZAS	46
2.4.1 Tipos de cinzas	47
2.4.2 Processo de geração	48
2.4.3 Reaproveitando cinzas.....	49
2.5. TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO/SOLIDIFICAÇÃO	50
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1. ESTRUTURA METODOLÓGICA.....	55
3.2. MATERIAIS	56
3.2.1 Cimento Portland CP III-40 RS.....	57
3.2.2 Agregado miúdo	58

3.2.3	Cal Hidratada	59
3.2.4	Cinza do reator de leito fluidizado	60
3.3.	MÉTODOS	60
3.3.1	Conhecimento da fonte geradora	60
3.3.2	Análise dos extratos lixiviado e solubilizado da cinza	61
3.3.3	Difratometria de Raios-X	64
3.3.4	Granulometria	64
3.3.5	Determinação de massa unitária e massa específica	65
3.3.6	Teor de finura do material.....	66
3.3.7	Superfície específica	67
3.3.8	Perda ao fogo	67
3.3.9	Análise de pozolanicidade com cimento	68
3.3.10	Análise de pozolanicidade com cal.....	69
3.3.11	Resistência à compressão – análise mecânica da matriz	69
3.3.12	Eficiência de estabilização das matrizes.....	71
3.3.13	Resistência à compressão – adequação das matrizes.....	72
3.3.14	Eficiência de estabilização da matriz adequada	73
3.3.15	Tempo de pega da matriz adequada.....	73
3.3.16	Permeabilidade ao ar da matriz adequada	74
3.3.17	Processo de produção dos blocos prensados.....	75
3.3.18	Blocos - Determinação de resistência à compressão	77
3.3.19	Blocos - Determinação de absorção de água por imersão.....	77
3.3.20	Análise da eficiência de estabilização dos blocos.....	78
CAPÍTULO 4	RESULTADOS	79
4.1.	CLASSIFICAÇÃO DA CINZA <i>IN NATURA</i>	81
4.1.1	Conhecimento da fonte geradora	81
4.1.2	Análise dos extratos lixiviado e solubilizado da cinza <i>in natura</i>	83
4.1.3	Classificação matérias-primas	84
4.2.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO.....	85
4.2.1	Difratometria de Raios-x	85
4.2.2	Granulometria	86
4.2.3	Massa unitária e massa específica	87
4.2.4	Teor de finura do material.....	87
4.2.5	Superfície específica	88
4.2.6	Perda ao fogo	88
4.2.7	Análise da pozolanicidade com cimento	88
4.2.8	Análise de pozolanicidade com cal.....	90

4.3. ESTUDO DAS COMPOSIÇÕES PRELIMINARES	91
4.3.1 Resistência à compressão	92
4.3.2 Análise da eficiência de estabilização	92
4.3.3 Difração de raios-x	96
4.4. ADEQUAÇÃO DAS MATRIZES.....	98
4.4.1 Resistência à compressão das matrizes	101
4.4.2 Eficiência de estabilização da matriz adequada	103
4.4.3 Tempo de pega da matriz adequada	106
4.4.4 Permeabilidade ao ar da matriz adequada	107
4.5. PRODUÇÃO DOS BLOCOS	111
4.6. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS BLOCOS	114
4.6.1 Resistência à compressão	114
4.6.2 Absorção de água por imersão	116
4.6.3 Eficiência de estabilização	117
4.7. COMPOSIÇÃO ALTERNATIVA.....	120
CAPÍTULO 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	123
5.1. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO	125
5.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA CINZA	127
5.2.1 Difração de raios-x	127
5.2.2 Potencial pozolânico	128
5.3. ESTUDOS PRELIMINARES DAS MATRIZES DE CIMENTO E CINZA	129
5.3.1 Avaliação mecânica das matrizes	129
5.3.2 Eficiência de estabilização das matrizes	130
5.4. ADEQUAÇÃO DAS MATRIZES.....	132
5.5. PRODUÇÃO E DESEMPENHO DOS BLOCOS	136
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES.....	139
REFERÊNCIAS:	147
Anexo A: Relatório de ensaio de cimento	155
Anexo B: Granulometria agregado miúdo.....	157
Anexo C: Boletim de análises da cal	159
Anexo D: Análise físico-química cinza volante	161
Anexo E: Difrátogramas de raios-x	163

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de fabricação do cimento.	32
Figura 2: Diagrama de classificação dos Resíduos Sólidos	38
Figura 3: acondicionamento e disposição de resíduos industriais.....	40
Figura 4: Fluxograma da Estrutura Metodológica	55
Figura 5: Quarteamento das frações granulométricas da areia normal do IPT.	58
Figura 6: Cinza volante de reator de leito fluidizado circulante.....	60
Figura 7: Aparelho extrator para extrato lixiviado	62
Figura 8: Obtenção do extrato solubilizado	62
Figura 9: Procedimento de filtragem dos extratos lixiviado e solubilizado	63
Figura 10: Desmoldagem, identificação e cura – corpos-de-prova – ensaio de resistência à compressão.	70
Figura 11: Argamassa com características para prensagem e moldagem dos corpos-de-prova ...	72
Figura 12: Permeâmetro – aparelho para ensaio de permeabilidade ao ar.	75
Figura 13: Mini usina para produção de blocos prensados – Laboratório de Construção Civil – IAU.	76
Figura 14: Fluxograma simplificado do processo.	82
Figura 15: Difratoograma de raios-x da cinza volante.....	86
Figura 16: Ensaio de consistência – espalhamento com uso da flow table	88
Figura 17: Materiais para ensaio de pozolanicidade com cimento.....	89
Figura 18: Materiais necessários para ensaio de pozolanicidade com cal.....	91
Figura 19: Difratoograma de raios-x da matriz de cimento Portland com 25% de cinza volante....	96
Figura 20: Difratoograma de raios-x da matriz de cimento Portland com 50% de cinza volante....	97
Figura 21: Difratoograma de raios-x da matriz de cimento Portland com 75% de cinza volante....	98
Figura 22: Corpos-de-prova traço 1:3 (70% cinza) não apresentam condições para desmoldar	100
Figura 23: Aparelho de Vicat, ensaio de início e fim de pega.	107
Figura 24: Corpos-de-prova para ensaio de permeabilidade ao ar.....	108
Figura 25: Preparação corpos-de-prova para permeabilidade ao ar.	108
Figura 26: Área de produção dos blocos	112
Figura 27: Bloco descartado	113
Figura 28: Blocos moldados – Bloco C.V.	113
Figura 29: Preparação dos blocos para ensaio de resistência à compressão	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais compostos do cimento.....	33
Tabela 2: Limites aproximados de composição do cimento Portland	34
Tabela 3: Tipos de cimento	35
Tabela 4: Planilha geral de ensaios	56
Tabela 5: Caracterização do cimento	57
Tabela 6: Granulometria da areia comum	59
Tabela 7: Composição química da cal hidratada CH-III	59
Tabela 8: Planilha de quantidades – ensaio de determinação de resistência à compressão	70
Tabela 9: Resultados – lixiviação – cinza <i>in natura</i>	83
Tabela 10: Resultados – solubilização – cinza <i>in natura</i>	84
Tabela 11: Resultados solubilizações matérias-primas do reator.....	85
Tabela 12: Granulometria da cinza volante	87
Tabela 13: Quantidade dos materiais – Ensaio de pozolanicidade com cimento.....	89
Tabela 14: Ensaio de pozolanicidade de cimento – Resistência à compressão	90
Tabela 15: Quantidade de material para ensaio de pozolanicidade com cal.	91
Tabela 16: Resultados – resistência à compressão – cinza como aglomerante	92
Tabela 17: Resultado – Lixiviação nas matrizes com 25%, 50% e 75% de cinza	93
Tabela 18: Resultado – Solubilização nas matrizes com 25%, 50% e 75% de cinza.....	94
Tabela 19: Comparação dos resultados: solubilização da cinza <i>in natura</i> e solubilização das matrizes produzidas com percentuais de cinza como parte do aglomerante.....	94
Tabela 20: Eficiência de estabilização das matrizes que utilizam cinza volante como parte do aglomerante.	95
Tabela 21: Resultado – solubilização matriz branca.	95
Tabela 22: Planilha de quantidades – argamassas utilizando cinza como agregado.....	101
Tabela 23: Resultados-resistência à compressão-cinza como agregado	102
Tabela 24: Resultado – Solubilização na matriz 1:3 – 50% cinza como agregado	104
Tabela 25: Comparação dos resultados: Solubilização da cinza <i>in natura</i> e solubilização da matriz 1:3-50% cinza como agregado	104
Tabela 26: Eficiência de estabilização da matriz 1:3 (sendo o agregado 50% cinza e 50% areia) .	105
Tabela 27: Resultado – Solubilização – Matriz branca com cimento B.....	105
Tabela 28: Comparação entre as solubilizações das matrizes brancas.....	106
Tabela 29: Dados coletados no permeâmetro.....	109

Tabela 30: Resultados – Permeabilidade ao ar.	109
Tabela 31: Quantitativo de material – moldagem dos blocos	111
Tabela 32: Resistência à compressão – Bloco CV – 28 dias de cura.....	114
Tabela 33: Resistência à compressão – Bloco CV – 90 dias de cura.....	115
Tabela 34: Absorção de água – Bloco CV – 28 dias de cura	116
Tabela 35: Absorção de água – Bloco CV – 90 dias de cura	117
Tabela 36: Resultados – Solubilização – Bloco de cinza volante – 28 e 90 dias de cura.....	118
Tabela 37: Comparação entre solubilizações da cinza volante in natura e blocos com diferentes idades.	118
Tabela 38: Eficiência de estabilização – Blocos de cinza.....	119
Tabela 39: Comparação entre os percentuais de eficiência de estabilização.....	120
Tabela 40: Resultado-resistência à compressão matriz 1:3 30% cinza volante	120
Tabela 41: Resultado solubilização matriz 1:3 com 30% de cinza volante	121
Tabela 42: Comparação – solubilizações: cinza in natura, matriz 1:3 50% e matriz 1:3 30%	122
Tabela 43: Eficiência de estabilização da matriz com 30% de cinza como agregado	122
Tabela 44: Resultado solubilizações: cinza volante e matérias-primas que a compõem.	126
Tabela 45: Difração de raios-x - Presença de sílica	132

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Emissão de CO ₂ /t de cimento	36
Gráfico 2: Permeabilidade Darciana – BCV1: Bloco de cinza volante e R2: referência.....	110
Gráfico 3: Permeabilidade não-Darciana – BCV1: Bloco de cinza volante e R2: referência.	111
Gráfico 4: Resistência média dos blocos de cinza volante em diferentes idades de ruptura.....	115
Gráfico 5: Resistência média em MPa aos 28 dias – matrizes compostas com cinza volante	130
Gráfico 6: Gráfico comparativo de resistências à compressão.	133

RESUMO

A reciclagem de resíduos tem sido tema de diversos estudos e pesquisas, já que o meio ambiente vem sofrendo muitos impactos ambientais por conta do desenvolvimento da indústria mundial. Nessa linha, muitas empresas têm adotado estratégias mercadológicas ditas sustentáveis, procurando atender a um requisito que, atualmente, interessa a toda a sociedade: desenvolvimento sustentável. E uma das maneiras de haver desenvolvimento econômico sustentável, minimizando os impactos ao meio ambiente, é utilizar os resíduos gerados aplicando-os em outros processos de produção. Sendo assim, o presente trabalho propõe utilizar a cinza, que resulta da queima do carvão mineral adicionado ao calcário dolomítico e a areia, gerada pelo reator de leito fluidizado circulante de uma indústria produtora de alumínio localizada na área industrial de São Luís do Maranhão. O objetivo deste trabalho é avaliar a melhor utilização desse resíduo sólido industrial em matrizes cimentícias. A investigação experimental inicia com a classificação e caracterização do resíduo *in natura*, avaliando seu potencial pozolânico. Com os resultados dos ensaios foi possível indicar que o seu melhor uso é como agregado, devido sua característica de não pozolânico. Também, devido a sua composição granulométrica de característica mais fina e sua elevada superfície específica, propõe-se que a cinza seja adicionado como *filler*. A etapa seguinte compreende a produção de matrizes compostas de cimento, areia e cinza (utilizada como *filler*), nessa etapa foram testados vários traços, aferindo suas propriedades mecânicas e eficiência de estabilização da matriz. O traço que melhor respondeu a essas questões foi o 1 : 1,5 : 1,5 (cimento:areia:cinza), pois apresentou bom desempenho mecânico utilizando grande quantidade de resíduo. Definida a matriz, essa foi submetida a ensaios complementares, para então ser aplicada na produção dos blocos prensados. Os blocos apresentaram bom desempenho mecânico e físico. A eficiência da estabilização do resíduo na matriz apresentou bons índices nos extratos solubilizados e até 100% de estabilização por solidificação, porém alguns parâmetros ainda apresentaram resultado acima do estabelecido por norma. Conclui-se então, que os blocos de cinza volante podem ser utilizados na construção civil, desde que sejam seguidas algumas recomendações quanto a produção e utilização dos mesmos.

Palavras-chave: Resíduo sólido industrial; Estabilização/Solidificação; Reciclagem; Materiais de Construção Civil; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The recycling of waste has been the subject of several studies and research, since the environment has undergone many environmental impacts due to the development of the industry worldwide. For that reason, many companies have adopted so-called sustainable marketing strategies, trying to meet a requirement that currently involves the whole society: the sustainable development. And one way to achieve sustainable economic development while minimizing impacts on the environment is the use of generated waste by applying it to different production processes. Therefore, this research proposes the use of ash from burning coal added to the lime and sand, generated by circulating fluidized bed reactor of an industry that produces aluminum located in the industrial area of São Luís, Maranhão. The aim of this study is to evaluate the best use of industrial solid waste in cementitious matrices. The experimental investigation starts with the classification and characterization of the waste in nature, evaluating its pozzolanic potential. From the test results it was possible to indicate that its best use is as an aggregate, due to its non-pozzolanic characteristic. Also, due to its small granulometry and high specific surface, it is proposed the ash to be added as a filler. The next step involves the production of matrices composed by cement, sand and ash (used as filler). At this stage various compositions were tested, assessing their mechanical properties and efficiency on the matrix stabilization. The composition that better responded to these questions was 1: 1.5: 1.5 (cement: sand: ash), once it showed good mechanical performance using large amounts of waste. This matrix was subjected to further testing and was subsequently used to produce the compressed blocks. The blocks showed good mechanical and physical performance. The efficiency of waste stabilization in the matrix showed good levels in solubilized extracts and up to 100% stabilization by solidification, but some parameters still showed results above the established by the norm. We conclude that the blocks made using fly ash can be used in construction, since some recommendations regarding their production and use are followed.

Keywords: Industrial solid waste; Solidification/Stabilization; Recycling; Building Materials; Sustainability.

Capítulo

Introdução

Nas últimas décadas ouviu-se muito falar em sustentabilidade. Cidades sustentáveis, produtos sustentáveis, sociedade sustentável, entre outros termos. Essa discussão surgiu em decorrência dos muitos fenômenos apresentados pelo planeta, que por sua magnitude chamaram a atenção para o meio ambiente, desencadeando assim uma corrida por alternativas que possam mitigar os impactos ambientais causados com a busca pelo crescimento econômico. “No modelo de desenvolvimento econômico tradicional, os países buscaram de forma desenfreada o crescimento e a intensificação de suas atividades econômicas.” (MARQUES NETO, 2005. p 5). Parte da culpa pelos impactos ambientais é atribuída às indústrias, pois são poluidoras em grande escala, colocando diariamente no meio ambiente resíduos que sobram da produção de bens de consumo.

Apesar da crise econômica mundial em 2009, dados do IBGE demonstram que o setor industrial no Brasil já se recuperou e está em franco crescimento. “Em janeiro de 2010 a produção industrial avançou 1,1% frente a dezembro de 2009, eliminando a variação negativa de 1,0% acumulada nos dois meses anteriores. Frente a janeiro de 2009, a indústria registrou 16,0% de expansão.” (IBGE, 2010). Esse crescimento positivo demonstra que a indústria brasileira continua produzindo muito, e esse desenvolvimento tem como consequência o aumento na produção de resíduos. Seguindo a linha do desenvolvimento sustentável, que propõem apresentar alternativas para que possamos continuar crescendo sem provocar o esgotamento dos recursos naturais, pois “a idéia de desenvolvimento sustentável começou a se difundir à medida que crescia a consciência sobre o esgotamento dos recursos naturais” (CORBIOLI, 2003). O presente trabalho propõe o aproveitamento da cinza, que é um resíduo sólido gerado pelo reator de uma refinaria na área industrial de São Luís do Maranhão. O Consórcio de Alumínio do Maranhão, ALUMAR, tem como produto principal o alumínio. A fábrica está localizada na área industrial de São Luís e ocupa 350 ha. O reator de leito fluidizado circulante é utilizado para produzir energia para a planta da indústria e seu funcionamento gera um resíduo não aproveitado pela empresa, resíduo esse que, atualmente, é uma preocupação ambiental para a empresa e seu descarte é oneroso. O objetivo, então, é utilizar a cinza em matrizes de cimento Portland para produzir um elemento construtivo, utilizando menos materiais convencionais na composição e possibilitando a utilização desse resíduo, transformando-o em um subproduto. “Fornos de usinas termoeletricas

que empregam carvão como combustível [...] são as maiores fontes de subprodutos, os quais estão sendo produzidos num volume de milhões de toneladas a cada ano em muitos países industrializados. Acumular estes subprodutos em aterros representa uma perda de material e causa sérios problemas de poluição ambiental.” (MEHTA e MONTEIRO, 1994. p 291). Alguns tipos de cinzas podem apresentar características que possibilitam sua adição em matrizes de cimento, em geral as que apresentam sílica (SiO_2), elemento que tem a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio presente no cimento. “As cinzas de combustão do carvão e de alguns resíduos agrícolas, a sílica volatilizada de alguns processos metalúrgicos, e a escória granulada da indústria metalúrgica de materiais ferrosos e não ferrosos são os principais subprodutos industriais adequados ao emprego como aditivos minerais em concreto de cimento Portland.” (MEHTA e MONTEIRO, 1994. p 296). Mas, para utilizar esse subproduto é necessário que se tenha conhecimento de suas características, e principalmente de sua classificação, dessa maneira é possível determinar o uso mais correto. “O conhecimento das características e da classificação dos resíduos sólidos é um dos subsídios para o prognóstico de estratégias de gerenciamento de resíduos.” (ZANTA et al., 2006. p 1). E uma das estratégias no gerenciamento de resíduos, além de sua minimização ou das mudanças nos arranjos produtivos, é justamente aproveitar esses subprodutos. O presente trabalho apresenta resultados que mostram como é possível essa reutilização, transformando as matrizes compostas com resíduo em um produto desenvolvido para a construção civil.

1.1. JUSTIFICATIVA

O consórcio Alumínio do Maranhão esteve em processo de ampliação de suas dependências e conseqüentemente de sua produção de alumina e alumínio. Segundo dados divulgados na página eletrônica da empresa, a refinaria da fábrica produz aproximadamente 1.500.000 toneladas de alumina por ano, sendo que, com a conclusão das obras de expansão, a produção de alumina poderá chegar a 3.500.000 toneladas por ano. No início de 2010 foram executadas as últimas etapas da ampliação, período da inauguração do novo reator. Esse novo reator que é alimentado com carvão mineral, areia e calcário dolomítico, é o equipamento responsável por gerar os resíduos que esse

trabalho se propôs a estudar. Esse novo reator teve sua capacidade de produção de energia ampliada e conseqüentemente, o crescimento na produção de resíduos, que já era de 20.000 t por ano. Essa é a principal justificativa para estudar a cinza, uma grande geração do resíduo aliada a uma pequena utilização do mesmo. E fazendo a utilização desse subproduto também são agregados outros benefícios, tais como, evitar a construção de novos pátios de estocagem de resíduo e evitar novos processos de licenciamento junto aos órgãos ambientais.

Mas porque utilizar esse resíduo na produção de artefatos para a construção civil? Alguns estudos comprovam que as cinzas têm propriedades pozolânicas. O produto mais conhecido é a cinza volante, que é resíduo da queima do carvão mineral. O processo acontece em altas temperaturas fazendo com que a cinza fique pulverizada. Segundo John (et al, 2003. p 146) diferentes resíduos podem ser utilizados na produção de aglomerantes e a cinza volante produto da calcinação de carvão mineral em caldeiras de leito fluidizado é um deles. Estudos da Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC do Rio Grande do Sul comprovaram que a cinza volante tem atividade pozolânica. Sendo assim, esse subproduto industrial pode ser adicionado, em teores controlados, na composição de argamassas, podendo contribuir para aumentar o desempenho das mesmas, pois “em concretos frescos que mostram uma tendência à exsudação e à segregação, é sabido que a incorporação de partículas finamente divididas geralmente melhora a trabalhabilidade por reduzir o tamanho e o volume dos vazios” (METHA e MONTEIRO, 1994. p 301). Podendo também representar economia nas composições se usado como agregado, pois “por serem materiais baratos, os agregados incorporam a economia como sua principal função na composição dos concretos e argamassas [...] os agregados ajudam a aumentar a estabilidade (redução da retração) e a resistência, principalmente ao desgaste ao fogo, além de influenciar na condutibilidade térmica.” (ARAÚJO, RODRIGUES e FREITAS¹, 2000. *apud* SICHIERI et al, 2008. p 138).

Conclui-se assim que o uso desse material pode ajudar a: preservar o meio ambiente; reduzir a exploração dos recursos naturais, pois quando utilizamos a cinza deixamos de utilizar materiais convencionais extraídos da natureza; minimizar os passivos

¹ ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. G. A. **Materiais de Construção**. Seropédica - RJ: Editora Universidade Rural, 2000. 230p.

ambientais das empresas; e ainda promover a produção de construções sustentáveis. “Os resíduos (subprodutos) podem ser utilizados com vantagem para substituir materiais nobres e caros, economizar energia e salvaguardar o meio ambiente” (CASANOVA, 2008).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Utilizar cinzas volantes geradas pelo reator de leito fluidizado circulante de uma indústria em São Luís – MA no desenvolvimento de componentes para a construção civil.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Classificar o resíduo em relação ao potencial de contaminação;
- Caracterizar física e quimicamente o resíduo²;
- Determinar o desempenho físico, químico e mecânico das matrizes de cimento Portland produzidas com cinza volante.
- Definir composições de matrizes de cimento Portland, com cinza volante, para serem utilizadas na produção de elementos construtivos.
- Estabelecer o processo adequado de produção de elementos construtivos, empregando as matrizes com melhor desempenho.
- Determinar o desempenho físico, químico e mecânico dos elementos construtivos.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi organizada basicamente em seis capítulos: Introdução, Revisão bibliográfica, Materiais e métodos, Resultados, Discussão dos resultados e Conclusões.

No Capítulo 1, estão dispostos os objetivos e a justificativa. Além disso, é colocado um contexto geral a cerca das idéias centrais do trabalho.

O Capítulo 2 é composto de toda a revisão bibliográfica sobre os assuntos que norteiam a pesquisa. Os principais temas pesquisados foram: construção civil e

² O método de caracterização da cinza in natura está disposto do item 3.3.3 ao item 3.3.10.

desenvolvimento sustentável, resíduos sólidos, cinzas, cimento Portland e técnicas de estabilização/solidificação. Essa pesquisa bibliográfica embasa o trabalho com conceitos, teorias e experiências e, dá subsídios para a análise e discussão dos resultados.

O Capítulo 3 detalha todos os materiais utilizados na pesquisa e ainda discorre sobre os procedimentos da fase de investigação experimental, discriminando os ensaios de cada fase, apontando as normas vigentes e ainda discorrendo sobre o passo a passo de cada ensaio.

No Capítulo 4 estão os resultados da pesquisa, todas as tabelas, gráficos e resultados quantitativos ou qualitativos encontrados na fase de investigação experimental.

O Capítulo 5 discorre sobre as discussões acerca dos resultados. Nessa fase do trabalho são aliados os conhecimentos levantados na revisão bibliográfica com os resultados da investigação experimental, possibilitando que a análise seja feita com embasamento teórico.

No Capítulo 6 são colocadas as conclusões referentes à pesquisa e recomendações sobre o elemento construtivo desenvolvido. Sendo ainda colocadas algumas sugestões para continuidade da pesquisa.

Capítulo

Revisão Bibliográfica

2.1. CONSTRUÇÃO CIVIL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Pensar em desenvolvimento sustentável é pensar nas atividades humanas, e essas em geral são predatórias e geram resíduos, transformando-se em um empecilho para atingir a meta da sustentabilidade. Um dos grandes marcos do crescimento da economia, por conta do desenvolvimento das atividades humanas, foi a Revolução Industrial, o advento das indústrias e da produção em série intensificou a geração de resíduos. “O crescimento econômico que a maioria das partes do planeta teve, principalmente depois da ‘revolução industrial’, foi predatória, pois esgota os recursos naturais e deixa muitos resíduos poluentes para o meio ambiente.” (PISANI, 2008.p 30). Com a industrialização, o setor da construção civil contou com novos materiais, novos métodos construtivos e foi beneficiado com a capacidade de edificar com mais rapidez. Porém, tudo isso teve como consequência, maior exploração dos recursos naturais para produção de quantidades, cada vez maiores de materiais de construção e ainda muitos resíduos gerados pelas indústrias de transformação de matéria-prima e materiais de construção.

A partir dos anos de 1960, com a intensa industrialização e o aparecimento de algumas consequências na natureza, surgiram os primeiros grupos de discussão sobre desenvolvimento sustentável, mas foi em 1985 que “a ONU conferiu ao PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) a tarefa de enquadrar as questões ambientais globais e esboçar políticas relativas ao meio ambiente” (SANTOS, 2005.p 8). Foi então criada a Comissão Mundial sobre o Desenvolvimento e o Meio Ambiente – WCED. A principal produção da comissão foi o Relatório Brundtland que apresentou uma “síntese dos problemas ambientais da atualidade e um repertório de estratégias sugeridas para o seu equacionamento” (SOARES³, 2003 *apud* SANTOS, 2005.p 8). A partir dessas iniciativas, foram formadas outras comissões e outros encontros com o objetivo de discutir desenvolvimento sustentável e propor soluções, principalmente colocando metas a serem cumpridas, tal como a Eco-92 que deu origem à Agenda 21.

³ SOARES, G. F. S. **A Proteção Internacional do Meio Ambiente**. Barueri, SP: Manole, 2003.

2.1.1 Conceitos

“O termo sustentabilidade teve sua principal gênese nos pensadores econômicos Ignacy Sachs e Karl William que desenvolveram e defenderam a idéia da *ecosocioeconomia* por volta de 1970.” (AMODEO, 2008.p 51). Somente depois, esse termo, que tem origem na economia, passou a ser utilizado na questão ambiental.

Já o termo desenvolvimento sustentável é melhor definido pela WCED da ONU: “A humanidade é capaz de fazer desenvolvimento sustentável, assegurando que a sociedade atual encontre as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de gerações futuras em alcançar suas próprias necessidades”. (WCED⁴, 1987 *apud* SANTOS, 2005.p 8). Muitos estudiosos, desde o início de toda essa discussão, vêm realizando estudos e apontando caminhos para a meta da sustentabilidade, mas segundo Pisani (2008.p 29) atingir um desenvolvimento sustentável, apesar de ser fundamental para o planeta no século XXI, é um objetivo difícil de ser alcançado, pois o desenvolvimento sempre terá impactos no meio ambiente.

Uma das atividades que gera muitos impactos ao meio ambiente, seja pela extração de matéria-prima, seja pela emissão de poluentes para a produção de materiais, é a atividade da construção civil. “A produção de materiais de construção consome aproximadamente 50% dos recursos naturais gastos no mundo”. (EDWARDS e HYETT, 2005 *apud* PISANI, 2008). Esse dado é apenas um de tantos que demonstram como a construção civil precisa transformar sua cadeia produtiva para contribuir com o desenvolvimento sustentável.

2.1.2 Sustentabilidade na construção civil e na arquitetura

O profissional de arquitetura e urbanismo, e todos os outros que estão envolvidos com o setor da construção civil, estão diretamente ligados às modificações no meio ambiente e também a exploração dos recursos naturais. Todas as transformações ocorridas nas cidades precisam de diversos produtos que tem sua origem na natureza. “Está na própria natureza da profissão do arquiteto e do urbanista a transformação do

⁴ WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT – WCED. Our Common Future. Great Britain: Oxford University Press, 1987.

meio ambiente em que vive, ao longo da história e em qualquer região do planeta.” (AMODEO, 2008.p 51). Atualmente uma das tarefas desses profissionais é pensar em projetos e construções que possam mitigar a extração dos recursos naturais. Para isso, se faz necessário entender e adquirir a noção de sustentabilidade, e adotar ações dentro do contexto da arquitetura e construção.

Mesmo os estudos sobre desenvolvimento sustentável sendo iniciados nos anos de 1970, e continuados nos anos de 1980, a idéia de sustentabilidade só viria alcançar a construção civil em meados da década de 1990. E para entender como seria aplicado esse desenvolvimento sustentável na construção, foi necessário antes, que o setor adquirisse alguns conceitos advindos de outras áreas, tais como economia, sociologia e ecologia. Quando “se tornou evidente a finitude dos recursos do planeta, impondo à engenharia a necessidade de se articular com outras áreas de conhecimento para aprender a lidar com a escassez, a preservação ambiental e com a própria responsabilidade sobre os produtos que criava” (FORMIGA [org.], 2010.p 19), se fez necessário entender todo o contexto. E não só para a construção, a discussão é anterior a isso, desde a concepção, passando pelo projeto, é preciso ter os conceitos da cadeia da sustentabilidade bem entendidos. “As questões da sustentabilidade em arquitetura e urbanismo não podem ser compreendidas sem o sentido econômico mais amplo e sem o sentido do desenvolvimento social e da preservação cultural.” (AMODEO, 2008.p 52)

“Sustentabilidade em arquitetura é a atitude de todos os agentes envolvidos no sistema de produção arquitetônica, em especial do profissional arquiteto, focada na busca de soluções para conservação de recursos e com menores impactos ambientais decorrentes da intervenção em todas as fases de produção, do projeto à obra, do uso à manutenção, da extensão da vida útil ao descarte final da edificação.” (AMODEO, 2008.p 54)

Diante dessas reflexões é possível definir construção sustentável como aquela que, desde a concepção e projeto até a demolição, passando por todos os outros estágios do seu ciclo, promove a renovação do mesmo.

Quando se reflete sobre construção sustentável, um dos assuntos que vem a tona é o reaproveitamento de resíduos na produção de materiais para a construção civil. O esforço em pesquisar resíduos que possam ser utilizados como parte componente na produção de materiais tem como objetivo inserir esses resíduos em outro processo

produtivo, ou seja, podemos tirar esse resíduo de um processo linear e colocá-lo num processo de produção cíclico. “Quando se fala em resíduos [...], no caso de materiais e componentes de construção, deseja-se alcançar o objetivo de voltar com os referidos resíduos para o processo e a fabricação de produtos pertencentes às cadeias da indústria da construção civil” (CALMON, 2007.p 1592). Outro assunto que se apresenta com muito valor, é a questão da diminuição no consumo de materiais e componentes.

Nenhum setor da economia tem a escala de produção da indústria de materiais de construção. E essa escala faz diferença: mesmo que os materiais de construção ao longo do seu ciclo de vida tenham menor impacto ambiental por unidade de massa que o das outras indústrias [...], a enorme quantidade faz com que o impacto ambiental total do setor ou de dado material específico seja importante. [...] Assim, um dos desafios da construção é diminuir a intensidade de uso de materiais pela construção civil. (JOHN, 2007.p 97)

E diminuir o consumo de materiais, não necessariamente significa diminuir o ritmo de construção. É necessário, porém que se invista em técnicas que utilizem menor quantidade de material e também materiais que consumam menos matéria-prima em sua produção.

2.1.3 Materiais e produtos sustentáveis

A humanidade tem vivido com base num paradigma que contrapõe as necessidades das futuras gerações. O modelo de produção é linear, em que os bens são concebidos, projetados, construídos, utilizados e, após a vida útil, são acumulados no meio ambiente [...]. O que se busca é um modelo fechado ou modelo cíclico de produção e consumo que faça parte do desafio do desenvolvimento sustentável. (CALMON, 2007.p 1592)

Alguns produtos já começam a fazer parte desse ideário citado por Calmon. Seguindo o raciocínio do autor, é possível dizer que um produto sustentável é aquele que se enquadra num modelo cíclico de produção, ou seja, aqueles que possam voltar para as fases iniciais de produção após sua vida útil. A cultura de cana pode ser vista como uma que tem buscado essa produção cíclica. O bagaço da cana, que seria o resíduo do processo produtivo, vem sendo usado como combustível para os equipamentos das

indústrias produtoras de álcool e a cinza que sobra da queima do bagaço é utilizada em processos produtivos de produção de componentes para a construção civil.

Processos como o da cana-de-açúcar ainda não são comuns nos dias de hoje. Talvez seja possível dizer que, a fase atual é a de pesquisas sobre ciclo de vida dos materiais e componentes, para que depois seja possível colocar para as indústrias como seus materiais podem ser sustentáveis. No caso da construção civil a dificuldade torna-se um tanto maior, pois são utilizados muitos materiais e componentes diferentes para produzir um edifício. A pesquisa avança no sentido de reutilizar e reciclar os resíduos de construção e demolição para produzir novos componentes de construção. Sendo também desenvolvidas várias pesquisas que tem o objetivo de utilizar resíduos, das mais diversas fontes, na produção de materiais e componentes de construção.

2.2. CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico. “A ASTM 150 define 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.” (METHA e MONTEIRO, 1994.p 188). Segundo Sichieri (et al, 2008.p 36) os aglomerantes são materiais pulverulentos que formam uma pasta cimentante em presença de água, sendo que o endurecimento acontece lentamente e é resultante de uma reação química, física ou físico-química entre o aglomerante e a água.

2.2.1 Produção

O cimento é produzido basicamente de clínquer, que é feito através da britagem de dois minerais básicos: o calcário e a argila. A produção do clínquer consiste em “moer a matéria-prima, misturá-la apropriadamente, e queimá-la em forno rotativo a uma temperatura de 1400°C, quando o material sofre a sinterização e funde, parcialmente, formando bolas” (NEVILLE, 1982.p 2). Essas bolas são as pelotas de clínquer, e para produzir qualquer tipo de cimento é necessário adicionar cerca de 3% de gesso ao

clínquer, esse componente serve para retardar a pega e deixar o material em condições de ser manuseado. Para finalizar a produção, o clínquer recebe adições junto ao moinho que produz o pó de cimento tal como conhecemos, que estará pronto para ser ensacado e distribuído. Processo ilustrado na Figura 1.

“Os materiais de construção são importantes contribuintes para a mudança climática, principalmente porque combustíveis fósseis são consumidos na produção e no transporte desses materiais, e muitos deles utilizam calcário como matéria-prima.” (JOHN, 2007.p 107). O grande vilão na produção do cimento é justamente a produção do clínquer, pois é para produzi-lo que acontece a extração exacerbada das matérias-primas e grande emissão de CO₂. Essa emissão acontece quando da transformação da pasta de calcário e argila, no forno, onde “a pasta, no seu movimento forno a baixo, encontra temperaturas progressivamente mais elevadas. Primeiro a água é eliminada e o CO₂ liberado; depois, o material seco sofre uma série de reações químicas que até, finalmente, na parte mais quente do forno, 20% a 30% do material se liquefaz e o calcário, a sílica e a alumina se recombinaem, então a massa se funde formando bolas.” (NEVILLE, 1982.p 3).

Figura 1: Fluxograma de fabricação do cimento.

Fonte: ABCP⁵

⁵ Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/fabricacao/fabricacao>. Acesso em 22 de junho de 2010.

Essa perda de CO₂, necessária para a reação química e para a produção do material, tem outros aspectos. “Para produção de uma tonelada de clínquer é necessário mais de uma tonelada de calcário. Aos mais de 500 Kg de CO₂ emitidos pela calcinação do calcário deve ser somado o CO₂ emitido pela queima de combustíveis fósseis. [...] A emissão de CO₂ por tonelada de cimento é reduzida proporcionalmente à substituição do clínquer por outras matérias-primas, como adições minerais.” (JOHN, 2007.p 108).

2.2.2 Composição química do cimento

“As matérias-primas usadas na fabricação do cimento Portland se constituem, principalmente, de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Essas substâncias reagem entre si no forno, dando origem a uma série de produtos mais complexos e [...] é alcançado um estado de equilíbrio químico” (NEVILLE, 1982.p 7). Esses produtos são responsáveis pelas principais características do cimento, conseqüentemente essa química é também responsável pelas reações que acontecem quando misturamos esse aglomerante com água ou agregados dos mais diferentes tipos, inclusive resíduos sólidos industriais. Os principais compostos químicos do cimento são os silicatos, pois somados correspondem a mais de 50% da composição, como pode ser visto na Tabela 1, onde também é possível ver os quatro principais compostos do cimento.

COMPOSTO	CONSTITUIÇÃO	SÍMBOLO	TEOR (%)
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	42-60
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	10,0-35
Aluminato Tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	6,0-13
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	5,0-12

Tabela 1: Principais compostos do cimento
Fonte: Sichieri [et al], 2008. Adaptado pela autora

Cada composto desse é responsável por determinadas características presentes nesse aglomerante hidráulico que é o cimento. O C₃S é o principal composto, “ocorre sob a forma de pequenos grãos incolores e de dimensões iguais” (NEVILLE, 1982.p 9), e segundo Sichieri (et al, 2008.p 112) apresenta inicio e fim de pega em poucas horas e ainda resistência à compressão de 70MPa em 360 dias.

Segundo Neville (1982.p 8) os silicatos presentes no cimento não são compostos puros, pois existem os óxidos secundários que estão presentes nas soluções sólidas, e esses são responsáveis por algumas características que interferem nas propriedades hidráulicas dos silicatos. Os principais óxidos secundários estão listados na Tabela 2. Desses, alguns apresentam importância na composição do cimento, tais como: óxido de sódio (Na_2O) e óxido de potássio (K_2O), esses são os chamados álcalis, e eles podem reagir com alguns tipos de agregados, tendo como consequência a desintegração do concreto entre outras. Por isso o percentual desse tipo de composto é o menor possível na produção do cimento.

ÓXIDO	TEOR (%)
CaO	60-67
SiO_2	17-25
Al_2O_3	3,0-8,0
Fe_2O_3	0,5-6,0
MgO	0,1-4,0
Álcalis	0,2-1,3
SO_3	1,0-3,0

Tabela 2: Limites aproximados de composição do cimento Portland

Fonte: Neville, 1982. Adaptado pela autora

2.2.3 Tipos de cimento

Segundo a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) no mercado brasileiro estão disponíveis oito tipos de cimento Portland, sendo que suas variações podem dispor de até 11 opções diferentes. Esses tipos se diferenciam de acordo com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, material carbonático e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário, acrescentadas no processo de moagem.

CIMENTO PORTLAND TIPO	SIGLA	VARIAÇÕES	DESCRIÇÃO
COMUM	CP I	CP I	cimento comum
		CP I-S	cimento comum com adição
COMPOSTO	CP II	CP II-E	composto com escória (até 34%)
		CP II-Z	composto com pozolana (até 14%)
		CP II-F	composto com filler (de 6% a 10%)
DE ALTO-FORNO	CP III		adição de até 70% de escória de alto forno
POZOLÂNICO	CP IV		adição de pozolana de 15% a 50%
DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL	CP V-ARI		maior % de C_3S
RESISTENTE A SULFATOS	(RS)		menor % de C_3A

Tabela 3: Tipos de cimento

Fonte: acervo da autora com base em dados da ABCP, 2010 e Sichieri [et al], 2008.

A base da produção de cimento é o clínquer e a produção de clínquer consome muita matéria-prima e libera grande quantidade de CO_2 . Segundo Yang (et al, 2005.p 303) mais de 11,4 bilhões de toneladas de cimento são consumidas anualmente no mundo. Sendo relatada uma produção de 2,2 bilhões de toneladas de cimento em 2005. E essa exigência para consumo do material só aumenta com o tempo. A produção de cimento é responsável por 5% da emissão de gases do efeito estufa, que são criadas por atividades humana. Portanto, a integração das preocupações de sustentabilidade na concepção de materiais de engenharia civil tornou-se uma necessidade urgente.

No caso do CP III, tipo empregado no produto proposto por esse trabalho, que é conhecido como cimento Portland de alto-forno, sua composição pode apresentar apenas 30% de clínquer, já que sua produção é feita com adição de 35% a 70% de escória de alto-forno, segundo NBR 5735 (ABNT, 1991), por isso a utilização do cimento tipo CP III é algo que pode ajudar a resguardar o meio ambiente. Carvalho (2001 *apud* JOHN, 2007.p 109) apresenta um gráfico que mostra o efeito de substituição do clínquer na emissão de CO_2 . São apresentados quatro tipos de cimento: CP I, CP IIE, CP III e o CP IV. De todos esses, o que menos emite CO_2 é o CP III, em média 250 kg de CO_2 por tonelada de cimento produzido e o que mais polui é o CP I, são mais de 800 kg de CO_2 por tonelada de cimento produzido conforme Gráfico 1.

Gráfico 1: Emissão de CO₂/t de cimento

Fonte: Carvalho, 2001 *apud* John, 2007

Algumas características do CP-III são: maior impermeabilidade e durabilidade, baixo calor de hidratação, alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado e resistência a sulfatos, segundo dados da ABCP.

2.2.4 Argamassas

“Argamassas são materiais de construção, com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e água” (CARASEK, 2007.p 863). No caso das argamassas de cimento Portland, a composição é feita de cimento Portland, areia e água. As argamassas feitas com cimento Portland são classificadas como hidráulicas, pois são “aquelas que em função das características do aglomerante endurecem pela ação da água e resistem satisfatoriamente quando imersa em água” (ARAUJO, RODRIGUES e FREITAS, 2000 *apud* Sichieri [et al], 2008.p 177). Segundo Sichieri (et al, 2008.p 168) esse tipo de argamassa pode ainda ser classificada segundo sua consistência, podendo ser: secas, quando contém pouca água; plásticas, quando a relação água/aglomerante é o suficiente para conseguir trabalhabilidade; e fluidas, quando contém excesso de água.

2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída em agosto de 2010, resíduo sólido é todo elemento que precisou ser descartado pelo resultado de alguma atividade humana, ainda que sejam esses elementos, líquidos ou até mesmo gases.

Resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semi-sólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. (Lei nº 12.305, 2010. Inciso II, Art. 3º, parágrafo XVI)

Em seu texto, a Lei 12.305/2010 classifica esses resíduos sólidos quanto a sua origem. No capítulo I do Título III, onde são colocadas as disposições preliminares, o artigo 13 dispõe a classificação a seguir:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;

k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

Como é possível facilmente identificar, de acordo com a Lei citada, alguns tipos acabam se inserindo dentro de outros. De maneira mais didática os resíduos sólidos são classificados por estudiosos da área de gestão e gerenciamento em duas categorias básicas, que se dividem em sete subdivisões de acordo com a fonte geradora. As duas divisões básicas são: resíduos urbanos e resíduos industriais. Os resíduos urbanos são quatro: domiciliares, de serviços de saúde, de construção e demolição e os resíduos de poda e capina. E os resíduos industriais são três: resíduos da indústria de transformação, resíduos radioativos e os agrícolas. Os pesquisadores do NEPER (Núcleo de Estudos e Pesquisas em Resíduos Sólidos), coordenados pelo Prof. Dr. Valdir Schalch, criaram o diagrama colocado na Figura 2, onde essa classificação é facilmente visualizada.

Figura 2: Diagrama de classificação dos Resíduos Sólidos

Fonte: Schalch⁶, 2010. Adaptado pela autora

⁶ Diagrama apresentado nas aulas do curso de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, ministrado pelo Prof. Dr. Valdir Schalch durante o primeiro semestre de 2010.

Os resíduos são classificados, ainda, quanto aos riscos potenciais. A normalização brasileira utiliza uma coletânea de normas, para classificar os resíduos quanto ao seu potencial de contaminação, é a chamada coletânea de resíduos sólidos. Os resíduos Classe I são os classificados como perigosos, ou seja, aqueles que podem apresentar riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Os resíduos Classe II são os considerados não-perigosos. Para fazer essa classificação são utilizadas as normas NBR 10005/2004, que dita procedimentos para extração do extrato lixiviado, que é analisado de acordo com os parâmetros estabelecidos pela NBR 10004/2004 que coloca o limite máximo para as substâncias identificadas nos extratos. Para os resíduos não-perigosos existe uma subdivisão, os resíduos considerados como Classe II podem ser Classe II-A, os chamados não-perigosos e não-inertes, que ainda podem conter alguma substância nociva, mas com baixos teores. E ainda, a Classe II-B, os não-perigosos e inertes, aqueles que não apresentam nenhum tipo de substância nociva à saúde humana e ao meio ambiente. Para essa segunda classificação é utilizada a NBR 10006/2004, que dita procedimentos para extração do extrato solubilizado, esse extrato também é analisado de acordo com os parâmetros exigidos pela NBR 10004/2004.

2.3.1 Resíduos sólidos industriais

"Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais." (Lei nº 12.305, 2010. Inciso II, Art. 7º, parágrafo VI). Assim são definidos os resíduos industriais de acordo com a atual Política Nacional de Resíduos Sólidos. Já a resolução CONAMA de 2002, que dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais, detalha esse conceito, conforme segue abaixo.

Resíduo sólido industrial: é todo o resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semi-sólido, gasoso - quando contido, e líquido - cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição. (CONAMA, Resolução nº313, 2002)

Na PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos) está disposto que as indústrias são responsáveis por todo rejeito que geram durante suas atividades de transformação de matéria-prima em produtos. De maneira geral a Lei só veio confirmar o que já era praticado em vários estados que já tem leis próprias para os resíduos. O que vem acontecendo é isso, as próprias indústrias gerenciam seus rejeitos e providenciam sua destinação final de acordo com o que foi acertado no documento de licença de implantação e de operação.

Muitas constroem pátios de estocagem para destinação final desses resíduos. Exemplos comuns são os aterros de inertes, que abrigam solo retirado de obras civis e ainda os pátios de estocagem de resíduos industriais. Alguns outros são levados para aterros sanitários que tenham infra-estrutura para receber tais resíduos, um exemplo disso são os resíduos eletro-eletrônicos, tais como aparelhos de TV que são depositados no Aterro Sanitário de Caieiras – SP, administrado pela empresa Essencis. Esse Aterro Sanitário apresenta uma área específica de aterro industrial, reservada para resíduos de classe I (perigosos). Nessa área são depositados resíduos industriais, tais como: resíduos de lâmpadas, baterias, pó de aciaria, areia de fundição, solos contaminados com metais pesados, amianto e chumbo. Alguns desses resíduos nem são considerados perigosos, mas são acondicionados todos juntos em pátios que ficam em uma área separada do restante do aterro. Os resíduos são colocados em bolsões de 1.000 L, e depois dispostos em pilhas (Figura 3) que são protegidas por uma manta e depois recebem as camadas finais de solo para reaterro e finalização da cobertura.

Figura 3: acondicionamento e disposição de resíduos industriais

Fonte: acervo da autora, 2010

Segundo dados do IBGE de 2008, apenas 136 municípios brasileiros tem coleta de resíduos sólidos industriais e/ou não inertes, sendo coletadas 344,4 t/d de tal resíduo. No Brasil existem 5.564 municípios, segundo dados do IBGE de 2007, sendo assim apenas 2,44% dos municípios brasileiros apresentam esse tipo de coleta. A pesquisa não aponta qual é a origem desses resíduos e nem quais seriam esses materiais. Mas fica claro que, pelo pequeno percentual apresentado, a grande maioria dos municípios brasileiros não tem essa questão como prioridade, e que a gestão dos resíduos industriais ainda não tem uma organização definida. Em 2002 foi instituída a Resolução CONAMA nº 313 que dispõe sobre o inventário de resíduos sólidos industriais, essa foi uma tentativa de conhecer a situação nacional desse tipo de resíduo, para que fosse possível elaborar Programas Estaduais e também o Plano Nacional de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais. A Resolução nº 313 define o inventário como “o conjunto de informações sobre a geração, características, armazenamento, transporte, tratamento, reutilização, reciclagem, recuperação e disposição final dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias do país.” (CONAMA, 2002). Esse conjunto de informações é apresentado através de um formulário preenchido pela própria indústria, onde é colocada toda a caracterização dos resíduos, tais informações seriam repassadas para o órgão estadual de meio ambiente. Esses órgãos estaduais teriam até dois anos, a contar da data da publicação da resolução, para apresentar ao IBAMA todos os dados levantados.

Com o objetivo de levantar informações sobre o panorama nacional do inventário de resíduos sólidos industriais, buscou-se no *site* do IBAMA algum documento que fizesse alusão aos levantamentos feitos pelos estados, mas as informações sobre o assunto estão divulgadas de maneira aleatória. Alguns estados divulgaram seus próprios inventários, tais como: Amapá, Ceará, Pernambuco, Paraíba, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, mas um documento onde todos os dados do Brasil fossem compilados não foi encontrado. A falta dessa informação prejudica o desenvolvimento de pesquisas e estratégias para gerenciar os resíduos sólidos industriais, pois o conhecimento de tipos, quantidades e outros dados é que dão subsídio para estabelecer as melhores estratégias.

2.3.2 Políticas normativas

A mais nova das políticas normativas no Brasil é a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, que propõe estabelecer diretrizes em âmbito nacional para esse assunto. Mas existem várias outras políticas normativas que envolvem o tema gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, tanto de maneira mais específica quanto do ponto de vista mais geral do meio ambiente. A seguir são apresentadas algumas políticas normativas que abrangem diferentes níveis hierárquicos, tanto na questão do meio ambiente em geral, quanto as que enfocam a questão dos resíduos sólidos.

- Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/2010.
- Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Resolução CONAMA nº 313/2002.
- Lei de Saneamento Básico. nº 11.445/2007.
- Política Estadual de Resíduos Sólidos – São Paulo. Lei nº 12.300/2006.

O resíduo estudado no presente trabalho é proveniente da área industrial localizada no município de São Luís – Ma. No nível hierárquico estadual, o órgão responsável pelos resíduos sólidos gerados é a Secretaria de Meio Ambiente – SEMA. É de sua competência “exercer o controle das fontes de poluição, de forma a garantir o cumprimento dos padrões de emissão estabelecidos.” (SEMA, 2011)⁷. Um de seus documentos normativos é o Decreto nº 13.494/2010, que regulamenta o Código de Proteção do Meio Ambiente. Segundo esse decreto, compete ao Sistema Estadual do Meio Ambiente (SISEMA), através de seus órgãos executivos e normativos: “disciplinar, controlar e fiscalizar a produção, armazenamento, transporte, comercialização, utilização e destino final de quaisquer produtos químicos, radiativos, físicos e biológicos, bem como seus resíduos e embalagens, que prejudiquem o equilíbrio ecológico do solo, ou interfiram na qualidade natural da água;” (Decreto nº 13.494/2010). Logo, é de competência desse órgão levantar os dados necessários para o inventário de resíduos sólidos industriais no estado do Maranhão. Mas, o inventário não está disponível para

⁷ Disponível em: <http://www.ma.gov.br/governo/index.php?lds=24>. Acesso em 29 de julho de 2011.

acesso ao público na página eletrônica da Secretaria, nem mesmo foi encontrado outro tipo de informação sobre os dados que deveriam ter sido repassados ao IBAMA. Um dado revelado em 2011 demonstra a falta de legislação do estado quanto a gestão de resíduos. Dados do Relatório de Gerenciamento de Resíduos Sólidos no estado do Maranhão, feito pelo Ministério Público⁸ no Maranhão constatou que, 80% dos municípios maranhenses faz sua disposição final em lixões. Apenas 2,4% dos municípios mantêm aterros sanitários, o que corresponde a três municípios dos 127 que participaram da pesquisa, pois os outros 90 se recusaram a participar. Esses dados apontam uma média superior à realidade brasileira, que é de 50% dos municípios fazendo sua disposição final em lixões. Esses dados revelam que o estado do Maranhão encontra dificuldades em resolver uma questão básica, que é a disposição final em aterros sanitários. Sendo então tarefa mais árdua a resolução das questões em relação aos resíduos industriais.

2.3.3 Impactos

Todas as leis, políticas, resoluções e outras formas de regulamentar a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos tem um intuito primordial, que é evitar que tais resíduos contaminem o solo, as águas superficiais e as águas subterrâneas, pois não contaminar o meio ambiente significa também preservar as bacias hidrográficas. No caso do resíduo sólido industrial estudado nesse trabalho, que atualmente tem destinação final em pátios dentro da própria área da empresa localizada na Ilha de São Luís, mudar a destinação pode ajudar a preservar a bacia hidrográfica que banha a área onde fica localizada a indústria. Essa BH é denominada de Estiva e segundo Araújo (et al, 2009.p 4633) tem 41,65 Km² de área, perímetro de 36,92 Km e está na 4ª ordem da hierarquia fluvial.

Outro impacto facilmente identificado é a poluição do ar. Dependendo do resíduo o ar pode ser poluído por poeiras ou gases advindos dos pátios de disposição final. Uma das normas vigentes que estabelecem procedimentos para determinar a concentração de material particulado é a NBR 9547/1997 – Material particulado em suspensão no ar ambiente. Vários controles devem ser feitos para que comunidades

⁸ Matéria disponível em: <http://imirante.globo.com/noticias/2011/02/07/pagina266043.shtml>. Acesso em: 27 de julho de 2011.

vizinhas e até mesmo a área administrativa da própria indústria não seja afetada por tal poluição. No caso do resíduo estudado por este trabalho, a disposição final é feita em pátios onde a cinza volante é armazenada passando por constante umectação para minimizar as poeiras com contaminantes. Caso essas poeiras não fossem controladas, poderiam causar sérios problemas de saúde por conta de substâncias nocivas presentes em sua composição tais como metais pesados e sulfatos.

Todos esses impactos, tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana, poderiam ser evitados, ou pelo menos minimizados, se a reutilização e reciclagem de tais resíduos fosse algo mais constante no meio industrial.

2.3.4 Reaproveitamento de resíduos sólidos

Segundo Calmon (2007) já em 1975 ocorreu um Simpósio cuja questão fundamental era se o uso de resíduos e subprodutos na indústria da construção poderia contribuir para conservar os recursos naturais utilizados. Já naquela época o resultado das discussões apontava como conclusão que “o sucesso na utilização de tais materiais dependeria da capacidade de competir economicamente com os materiais naturais que estariam substituindo, incluindo os custos de processamento e do transporte, além de um fator fundamental que é a durabilidade ao longo da vida prevista da aplicação construtiva.” (CALMON, 2007.p 1594)

Observa-se então que essa questão, tão discutida entre pesquisadores, vem de muito tempo. E ainda assim, é uma questão ainda não resolvida. Os produtos que utilizam resíduos em sua composição não precisam ser apenas bons produtos, tem que ser economicamente viáveis e duráveis, essas são exigências do mercado. Mas essa discussão econômica deve também avaliar que, se o produto feito com resíduo tem um processo produtivo que fica mais caro, por outro lado é possível deixar de consumir matéria-prima, isso reflete em uma economia ambiental, onde os recursos naturais são preservados.

Um dos princípios colocados pela nova Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS é fazer com que aconteça “o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania;” (Lei nº 12.305, 2010. Inciso II, Art. 6º, parágrafo VIII). Além do

aspecto ambiental, é possível identificar no texto a preocupação social. Esse aspecto é mais um ganho. Dessa forma é necessário analisar mais do que o aspecto econômico de reutilizar ou reciclar tais resíduos.

Um dos objetivos da PNRS é o “incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;” (Lei nº 12.305, 2010. Inciso II, Art. 7º, parágrafo VI). Outro objetivo explícito no texto da lei é a “prioridade, nas aquisições e contratações governamentais, para: a) produtos reciclados e recicláveis; b) bens, serviços e obras que considerem critérios compatíveis com padrões de consumo social e ambientalmente sustentáveis; (Lei nº 12.305, 2010. Inciso II, Art. 7º, parágrafo XI). Diante do exposto na Lei, cabe aos poderes públicos credenciar os sistemas construtivos que empregam os materiais de construção produzidos com adição de resíduos. Só assim, tais produtos poderão ser consumidos, não só através de obras e serviços públicos, mas também pela sociedade em geral.

No momento de fazer gestão e gerenciamento de seus resíduos gerados, algumas indústrias já incorporam a política dos R's. A indústria do aço, por exemplo, reutiliza muitos de seus resíduos no seu próprio processo de produção. Os materiais, que sobram de algumas fases do processo, voltam para estágios iniciais e entram novamente no processo. Isso evita ou pelo menos minimiza os gastos com a construção de áreas de disposição final ou com o manejo para aterros que tenham essa estrutura pronta. Outra forma de fazer o gerenciamento é reciclar os resíduos, colocando-os em outros processos de produção. Algumas políticas normativas já inserem em seus textos a necessidade de cada vez mais implantar esse tipo de gestão e gerenciamento dentro da própria empresa. A PNRS define algumas dessas estratégias, tais como reutilização e reciclagem. “Reutilização é o processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama⁹ e, se couber, do SNVS¹⁰ e do Suasa¹¹” (PNRS, 2010). Essa é uma das melhores formas de reaproveitamento de resíduos, pois como sua estrutura não precisaria ser transformada para que aconteça

⁹ Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama)

¹⁰ Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS)

¹¹ Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária (Suasa)

uma nova utilização, não é necessário dispor de mais energia e até outros recursos naturais. “Reciclagem é o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa.” (PNRS, 2010)

2.4. CINZAS

Cinzas são materiais granulares finamente divididos, resíduos da combustão de certas substâncias, as mais comuns são as cinzas geradas pela combustão do carvão. Parte da produção de energia elétrica gerada no país tem como fonte o carvão ou algum derivado. Dados do Balanço Energético Nacional – BEN de 2010, ano base 2009, demonstram que em 2009, 4,7% da oferta interna de energia foi obtida a partir do carvão mineral e derivados, totalizando $11.572 \cdot 10^3$ tep (tonelada equivalente de petróleo). O setor industrial é o maior consumidor dessa fonte, em 2009 o setor consumiu $2.949 \cdot 10^3$ tep de carvão mineral. E ainda tem o consumo de outros tipos de carvão como o metalúrgico e o vapor. O consumo de carvão mineral pela indústria vem crescendo, em 1973 o setor consumia 57,5%, já em 2007 já eram 80% de todas as fontes utilizadas pela indústria. Diante desses dados fica claro que a produção de cinzas provenientes da queima do carvão também tem elevada produção. Um exemplo da produção de cinza é colocado pelo BEN (2010), trata-se das cinzas do carvão vapor nacional que é produzido nas mais diversas formas quanto às suas características físico-químicas, apresentando teores de cinzas de 20% até 54% e múltiplas variações de teores de enxofre, voláteis, carbono fixo e outros. Segundo Babu e Rao (1993.p 223) com o aumento do uso do carvão nas atividades produtivas, a quantidade de cinza volante disponível assumiu proporções alarmantes, vindo a acarretar problemas ambientais associados a disposição, por isso se fez necessário avaliar as possibilidades de utilização do material.

A norma brasileira que trata de materiais com potencial pozolânico, define cinza volante como: “resíduos finamente divididos que resultem da combustão do carvão mineral pulverizado ou granulada com atividade pozolânica”. (ABNT, 1992). Essa cinza é

enquadrada como uma pozolana artificial, por isso existe o grande interesse de fábricas de cimento nesse material, é a adição dessa cinza que caracteriza o cimento pozolânico. Segundo Nardi¹² (1979 *apud* ANDRADE, 1991.p 5) datam do final do século XIX e início do XX os primeiros estudos para combinação do cimento Portland com a pozolana, mas somente em 1936 nos Estados Unidos aconteceu a primeira utilização da cinza volante como agente cimentante. “Pozolanas artificiais, materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica.” (ABNT, 1992).

As cinzas volantes de centrais elétricas movidas a carvão mineral podem ser vistas como um subproduto, caso se considere que são geradas durante um processo de produção de energia. Também podem ser vistas como resíduo, já que são o resultado final da combustão do carvão. (CALMON, 2007.p 1593)

“As características químicas das cinzas estão ligadas ao tipo de carbono que as originou e as transformações que ocorrem conforme a temperatura de queima, portanto trata-se de um produto bastante heterogêneo.” (MALLMANN, 1996.p 24). Sendo assim, elas podem apresentar teores diversos de sílica, dependendo de como ocorreu sua queima, podem ou não apresentar atividade pozolânica com outros elementos e podem apresentar partículas finas e maiores, sendo as cinzas volantes ou de grelha. Entre outras características diversas.

2.4.1 Tipos de cinzas

- Cinza de grelha: cinza produzida na queima de carvão mineral em caldeiras e que não é removida pelo fluxo de ar. Possui granulometria mais grossa. Sinônimo: Cinza pesada.
- Cinza volante: Material finamente particulado proveniente da queima de carvão pulverizado em usinas termoelétricas. Sinônimo: Pozolana.
- Cinza da casca do arroz: cinza produzida pela queima da casca de arroz.
- Cinza do bagaço da cana-de-açúcar: produzida pela queima do bagaço da cana.

¹² NARDI, J. V. **Introdução à estabilização de solos com cinza volante e cal**. Florianópolis: Divisão de Tecnologia do Departamento de Estradas e Rodagens, 1979.

- Cinzas de resíduos urbanos: Cinzas produzidas pela incineração de resíduos sólidos municipais em caldeiras.

Essa classificação, disponível na página eletrônica da Escola Politécnica da USP¹³, dá um panorama dos tipos de cinzas. Sejam essas, resíduos já gerados como cinzas ou ainda resíduos que foram queimados e transformados em cinzas, como é o caso dos resíduos agroindustriais, dos quais ainda podemos citar: a cinza da casca do coco da palma, cinza da cama sobreposta de suínos, cinza da serragem da madeira, cinza da casca do eucalipto, cinza da casca da castanha-do-pará e cinza da casca da castanha do caju.

2.4.2 Processo de geração

“A cinza é o resíduo originado da queima do carvão pulverizado na câmara de combustão a temperaturas variáveis entre 1000 e 1500°C sendo formada a partir dos componentes não combustíveis do carvão e também de partículas não queimadas devida combustão incompleta” (ANDRADE, 1991.p 11). Desse processo é possível obter dois tipos básicos de cinza, o “material que se aglomera caindo no fundo da câmara dá-se o nome de cinza pesada [...] os resíduos mais leves arrastados pelos gases de exaustão chama-se cinza leve ou volante” (ANDRADE, 1991.p 11)

Algumas cinzas são produzidas por siderúrgicas, tal como a escória de alto-forno. Porém, segundo John (1999) devido a limitações operacionais, em muitas siderúrgicas, uma parte da escória é resfriada lentamente e se cristaliza. Assim, em um só processo, geram-se dois resíduos, com a mesma composição química, mas com potenciais de reciclagem completamente diferentes, existindo ainda diferentes tipos de granulação: a com água e a por pelotização. Esta última resulta em um produto granular, de densidade mais baixa. Neste processo, os grãos de maior diâmetro possuem um teor de vidro menor e são normalmente mais adequados a agregados leves, e os grãos de menor diâmetro, que resfriam mais rápido, possuem um teor de vidro mais elevado, sendo utilizados na

¹³ Classificação disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/scripts/glossario1.idc>. Acesso em 22 de setembro de 2010.

produção de aglomerantes. Esses grãos de menor diâmetro são geralmente pulverizados, ou seja, são as cinzas volantes, que em geral apresentam características aglomerantes.

Outra forma de obter essas cinzas é pela combustão em caldeiras, reatores que tem como objetivo produzir energia. Esse é o caso das termoeletricas que utilizam combustão de carvão para produzir energia elétrica.

2.4.3 Reaproveitando cinzas

Segundo Hornain, Miersman e Marchand (1992.p 22) a utilização de cinza volante em concreto vem sendo uma prática comum a algumas décadas, pois tem vantagens econômicas e técnicas. “Em alguns casos, o uso de cinzas tende a melhorar a trabalhabilidade e coesão do concreto fresco [...]. De forma similar, algumas cinzas volantes podem diminuir significativamente a demanda de água no concreto e, conseqüentemente, aumentar a densidade da pasta de cimento.¹⁴” (HORNAIN, MIERSMAN and MARCHAND, 1992.p 22. Tradução da autora).

“No Brasil o emprego da cinza volante, resume-se apenas à sua utilização na fabricação de cimento pozolânico, onde aproximadamente 25% a 30% da cinza gerada é consumida.” (MALLMANN, 1996.p 19). Uma das características da cinza volante é sua heterogeneidade, sua composição depende de vários fatores, tais como: a origem da matéria-prima, o tipo de equipamento que faz a combustão, as temperaturas a que são submetidas, se existe ou não adição de outras matérias-primas ou componentes no processo, entre outros. Essa característica configura uma das dificuldades em lidar com a cinza e também pode justificar porque pesquisas como esta ainda continuam sendo desenvolvidas. Snyder¹⁵ (1967 *apud* ANDRADE, 1991.p 6 e 7) comentou as dificuldades em utilizar a cinza volante, além de muito heterogêneo, o material apresentava especificações inadequadas, incompletas, justamente pela falta de conhecimento do material. A grande variabilidade das cinzas obrigava a testes constantes e isso aumentava

¹⁴ “In many cases, the use of fly ash tends to improve the workability and cohesion of fresh concrete [...]. Similarly, some fly ashes significantly decrease the water demand of concrete and consequently increase the density of the cement paste.”

¹⁵ SNYDER, J. *Fly ash: specifications, limitations, and restrictions*. In: *Symposium on fly ash utilization*, 1967. Pittsburgh. Proceeding ... Washington: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mine. 1967. P. 37-45.

o custo de tal forma que às vezes os gastos eram maiores que o ganho com o material, tornando inviável sua utilização comercial.

Por outro lado, a reutilização das cinzas trás muitos benefícios para o meio ambiente e para a sociedade. Segundo John (2003.p 146) a reciclagem de cinzas apresenta inúmeras vantagens, reduz o volume de resíduos destinados a aterros sanitários e o risco de contaminação do meio ambiente, agravado pela disposição sem qualquer controle, como pode ser observado em diferentes setores da atividade industrial no Brasil, reduz o volume de extração de matéria-prima necessária à produção de aglomerantes, reduz a liberação de CO₂ que é gerado durante a produção do cimento.

Atualmente as cinzas mais pesquisadas no meio acadêmico brasileiro são duas de origem agroindustrial: a cinza da casca do arroz e a cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Isso pôde ser observado no último Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 2010), cujas sessões técnicas específicas de resíduos apresentaram vários trabalhos que pesquisaram tais cinzas, assim como no último Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção (ENARC 2011). Essas pesquisas são focadas principalmente na reutilização das cinzas em matrizes cimentícias, buscando a produção de argamassas e concretos produzidos a partir da reciclagem desses resíduos. Alguns desses subprodutos, como vêm sendo chamadas as cinzas, são utilizadas como aglomerante, por conta de sua grande concentração de sílica (SiO₂) e por apresentarem característica predominantemente amorfa, apresentando então capacidade pozolânica e aglomerante. Outras vêm sendo usadas como agregado na produção de argamassas e concretos.

2.5. TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO/SOLIDIFICAÇÃO

“Estabilização refere-se à técnica que reduz quimicamente o potencial de periculosidade de um resíduo por transformar o elemento para uma forma menos solúvel, móvel e tóxica” (FREEMAN¹⁶ et al., 1995 *apud* OLIVEIRA, 2003.p 27).

¹⁶ FREEMAN, H. M. and HARRIS, E. F. Solidification/Stabilization of Organics and Inorganics. In: Hazardous Waste Remediation Innovative Treatment Technologies. Lancaster: Tecnolgy Publishing, 1995. Chapter 27.

Segundo Wiles¹⁷ (1989 *apud* OLIVEIRA, 2003.p 27) encapsulação ou encapsulamento é um processo que envolve o revestimento ou enclausuramento de uma partícula tóxica ou um aglomerado de resíduos com uma nova substância, isto é, com um aditivo solidificante. A técnica de estabilização por solidificação em matrizes de cimento é uma das mais usadas e, está inserida na categoria dos processos inorgânicos junto com a estabilização feita com materiais pozolânicos. Nesse processo podem acontecer os dois tipos de estabilização, o físico e o químico. Segundo Sollars e Perry (1989 *apud* BRITO e SOARES, 2004) a tecnologia E/S foi desenvolvida para diminuir a disponibilidade dos elementos perigosos e aprisioná-los no interior de matrizes sólidas fisicamente e/ou quimicamente estáveis.

Caso o resíduo seja estabilizado ficando apenas enclausurado dentro da matriz, essa é uma estabilização física, mas se o resíduo reagir com o cimento na composição da argamassa, acontece então uma estabilização também de caráter químico. “A cimentação de resíduos é um dos processos de estabilização/solidificação empregados, visando a obtenção de um produto com características e integridade física adequadas, de forma a otimizar o seu transporte, armazenamento, disposição e/ou reutilização.” (SILVA, 2002.p 1). Segundo Conner e Hoeffner (1998.p 325), as técnicas de estabilização/solidificação surgiram com o intuito de melhorar a disposição final dos resíduos perigosos e outros resíduos que não poderiam ser utilizados em outros produtos, ou seja, o objetivo era minimizar o grau de periculosidade, isso tudo para não contaminar o solo das áreas de disposição final. “A tecnologia produz um material monolítico durável, reduzindo a capacidade de lixiviação dos componentes perigosos ao meio ambiente, sobre diversas formas de disposição.” (POON et al, 2003 *apud* BRITO e SOARES, 2004).

Estabilização refere-se às técnicas que reduzem o risco potencial de um resíduo, convertendo os contaminantes em sua forma menos solúvel, móvel ou tóxica. Solidificação refere-se às técnicas que encapsulam o resíduo em um sólido monolítico de alta integridade estrutural¹⁸ (CONNER e HOFFNER, 1998.p 326. Tradução da autora)

¹⁷ WILES, C. C. Solidification and Stabilization Technology. In: Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment e Disposal. Chapter 8 secção 7.8. McGraw-Hill, 1989.

¹⁸ “Stabilization refers to those techniques that reduce the hazard potential of a waste by converting the contaminants into their least soluble, mobile, or toxic form. The physical nature and handling characteristics of the waste are not necessarily changed by stabilization.”

As categorias mais conhecidas da técnica de estabilizar/solidificar um resíduo são: processos químicos, processos físicos e processos térmicos. Segundo Conner e Hoeffner (1998) essas categorias consistem em:

- **PROCESSO QUÍMICO:** aquele que necessita da reação química para o processo de estabilização acontecer. Em estabilização, essa forma consiste em algo tão simples como a neutralização do ácido para fornecer um ambiente alcalino, ou podem ainda envolver complexas reações. Na adição, processos mais químicos envolvem reações de solidificação do cimento ou de materiais pozolânicos. Esses processos são feitos principalmente à base de cimento, pozolana, cal e mistelâneas de aditivos.
- **PROCESSO FÍSICO:** esse não envolve reações químicas. O processo acontece pela adsorção ou absorção de constituintes em superfícies ou em poros. Pode acontecer ainda encapsulando-os em uma matriz que reveste as partículas constituintes e os dispersa no seu interior, separando fisicamente o constituinte perigoso do meio ambiente.
- **PROCESSO TÉRMICO:** esse tipo de processo também não é considerado químico, pois não existe a reação química. Seu processo pode ser classificado como físico, mas com a particularidade do uso da temperatura. O processo de polimerização de termo polímeros pode resultar em micro estabilização/solidificação dos constituintes do resíduo. Tal como acontece na estabilização/solidificação em polímeros termoplásticos e ainda no processo de vitrificação.

Uma das grandes vantagens dessa técnica é o uso do cimento, um material acessível. “A tecnologia baseada no cimento, apresenta vantagem comercial sobre outras tecnologias devido ao baixo custo para o tratamento de vários tipos de resíduos perigosos.” (POON et al, 2003 *apud* BRITO e SOARES, 2004).

Capítulo

Materiais e Métodos

3.1. ESTRUTURA METODOLÓGICA

A metodologia da pesquisa é basicamente experimental, e está dividida em duas etapas principais: análise do resíduo e análise das matrizes de cimento Portland compostas com resíduo. Para estabelecer as etapas da investigação experimental, foi elaborada a seguinte estrutura metodológica em seis etapas:

Figura 4: Fluxograma da Estrutura Metodológica

Fonte: acervo da autora, 2010

- *Classificação do resíduo quanto ao seu potencial de contaminação.*
- *Caracterização físico-química do resíduo.*
- *Estudo das composições das matrizes de resíduo e cimento Portland e verificação de suas propriedades mecânicas e químicas.*
- *Adequação das matrizes cimentícias e verificação de suas propriedades mecânicas e físico-químicas.*
- *Produção dos elementos construtivos.*
- *Determinação do desempenho físico, químico e mecânico dos elementos construtivos.*

A partir dessa estrutura foram delimitados os ensaios necessários para atingir os objetivos de cada etapa. A Tabela 4 apresenta os ensaios, e suas respectivas normas, organizados dentro de cada etapa. Essa planilha veio sofrendo alterações até mesmo depois do início da fase de execução dos ensaios, essas adequações contribuíram para que a caracterização do material e das matrizes, e posterior aferição do desempenho dos blocos, apresentassem resultados com contribuição para as análises.

CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO	1	Amostragem	NBR 10007/2004
	2	Análise do extrato lixiviado	NBR 10005/2004
	3	Análise do extrato solubilizado	NBR 10006/2004
	4	Classificação de resíduos sólidos	NBR 10004/2004
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO	5	Compostos químicos	Difratometria de raio X (DrX)
	6	Granulometria	NM 7211/2005
	7	Massa unitária	NBR 7251/1982
	8	Massa específica	NM 23/2000
	9	Finura do material	MB 3432/1991
	10	Superfície específica	NM 76/1998
	11	Perda ao fogo	NBR 5743/1989
	12	Análise de pozolanidade com cimento	NBR 5752/1992
	13	Análise de pozolanidade com cal	NBR 5751/1992
MATRIZES - COMPOSIÇÕES PRELIMINARES	14	Determinação de resistência à compressão	NBR 7215/1996
	15	Análise do extrato lixiviado	NBR 10005/2004
	16	Análise do extrato solubilizado	NBR 10006/2004
	17	Classificação de resíduos sólidos	NBR 10004/2004
	18	Compostos químicos	Difratometria de raio X (DrX)
ADEQUAÇÃO DAS MATRIZES	19	Determinação de resistência à compressão	NBR 7215/1996
	20	Análise do extrato solubilizado	NBR 10006/2004
	21	Classificação de resíduos sólidos	NBR 10004/2004
	22	Início e fim de pega	NBR NM 65/2003
	23	Permeabilidade ao ar	ASTM C577/1996
PRODUÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	24	Fabricação de blocos com prensa hidráulica	NBR 10833/1989
DESEMPENHO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	25	Determinação de resistência à compressão	NBR 8492/1984
	26	Determinação de absorção de água	NBR 8492/1984
	27	Análise do extrato solubilizado	NBR 10006/2004

Tabela 4: Planilha geral de ensaios
Fonte: acervo da autora, 2011

3.2. MATERIAIS

3.2.1 Cimento Portland CP III-40 RS

O cimento CP III-40 foi adotado por conta das suas características de produção, esse é o tipo de cimento que menos polui para ser produzido, já que é o tipo que menos usa clínquer no processo produtivo, conforme já colocado no item 2.2.3. As características gerais do cimento utilizado na pesquisa foram fornecidas pelo fabricante, conforme Tabela 5.

RELATÓRIO SEMANAL DE ENSAIO DE CIMENTO			
TIPO / CLASSE : CP III 40			
PERÍODO: 27/04/2010 a 22/05/2010			
ÁREA ESPECÍFICA (m ² /kg)	4005		
INICIO DE PEGA (min)	178		
FIM DE PEGA (min)	240		
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)	1º dia	11,1	
	3º dia	26,4	
	7 dias	36,2	
	28 dias	49,4	
ANÁLISE QUÍMICA (%)	P.F.		3,26
	SiO ₂		26,78
	R.I.		1,20
	Al ₂ O ₃		8,46
	Fe ₂ O ₃		2,22
	CaO		51,65
	MgO		3,27
	SO ₃		2,50
	CO ₂		2,75
	K ₂ O		0,70
	P.F. 500°C		0,65
	C ₃ A teórico		3,73

Tabela 5: Caracterização do cimento

Fonte: fabricante¹⁹, 2010

¹⁹ Informações cedidas pelo fabricante do cimento, enviadas a autora através de correio eletrônico em 01/06/2010. Documento disponível no Anexo A.

3.2.2 Agregado miúdo

Para a investigação experimental foram utilizados três tipos de areia: areia normal do IPT e duas areias comuns.

A areia normal do IPT foi adotada, pois a norma que dita os procedimentos para a produção e controle do cimento Portland, a NBR 7215/1996, determina que a argamassa feita para ensaio seja composta com essa areia, pois sua produção demanda controles específicos de materiais e processos. A areia padronizada do IPT é definida pela NBR 7214 (ABNT, 1982) como material natural quartzoso, extraído do Rio Tietê, na região do Município de São Paulo, em direção à nascente, produzido e fornecido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo e que satisfaz as condições especificadas pela referida norma a cerca das características de granulometria, material pulverulento, umidade, conglomerados argilosos, teor de feldspato, teor de mica e matéria orgânica. O material é fornecido nas seguintes frações granulométricas: areia grossa (1,2 mm), areia média grossa (0,6 mm), areia média fina (0,3 mm) e areia fina (0,15 mm) conforme Figura 5.

Figura 5: Quarteamento das frações granulométricas da areia normal do IPT.

Fonte: acervo da autora, 2010

Nos ensaios realizados com o objetivo de averiguar características mecânicas das matrizes de cimento Portland com resíduo, foi inicialmente utilizado como agregado uma areia de granulometria fina. O objetivo foi adotar uma areia que tivesse granulometria próxima à do resíduo, para que as características das argamassas fossem próximas entre si. Isso facilitaria a comparação entre os resultados. Granulometria disponível no Anexo B.

Na segunda fase de ensaios, de adequação das matrizes, foi utilizada uma areia comum, cuja granulometria pode ser vista na Tabela 6. Essa areia apresenta grãos maiores para compensar a quantidade de pó presente na cinza. Essa areia foi adotada depois de observado que a matriz feita com a areia de granulometria mais fina não apresentou bons resultados.

Peneira # (mm)	Amostra 1=500g		Amostra 2=500g		% médios	
	M. Retida	% Retida	M. Retida	% Retida	% Retida	% R. Ac.
9.5	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
6.3	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
4.75	3,7	0,7%	5,4	1,1%	1%	1%
2.36	27,0	5,4%	27,3	5,5%	5%	6%
1.18	51,9	10,4%	54,1	10,9%	11%	17%
0.6	129,6	26,1%	129,6	26,0%	26%	43%
0.3	140,7	28,3%	138,1	27,7%	28%	71%
0.15	129,4	26,0%	127,8	25,6%	26%	97%
Fundo	15,2	3,1%	16,3	3,3%	3%	100%
Soma	497,5	100,0%	498,6	100,0%	100%	335%
Diâmetro máximo característico:					4,75 mm	
Módulo de finura:					2,35	

Tabela 6: Granulometria da areia comum
Fonte: LCC-EESC, 2010

3.2.3 Cal Hidratada

A cal hidratada utilizada é do tipo CH-III, fabricada pela Itaú e comercializada pela Votorantim. Segundo o fabricante, a cal apresenta características conforme exige a NBR 7175/2003, tal como pode ser visto na Tabela 7. Outras características também foram cedidas pelo fabricante, tal como perda ao fogo de 25,74% e umidade 0,15%.

Constituintes	(%)
SiO ₂	3,17
Al ₂ O ₃	0,37
Fe ₂ O ₃	0,41
CaO	54,68
MgO	13,46
SO ₃	0,26

Tabela 7: Composição química da cal hidratada CH-III
Fonte: Fabricante²⁰

²⁰ As informações cedidas pelo fabricante da cal foram enviadas através de correio eletrônico no dia 18 de outubro de 2010. Documento disponível no Anexo C.

3.2.4 Cinza do reator de leito fluidizado

A cinza, utilizada nesse trabalho, foi cedida pela empresa ALUMAR - Consórcio Alumínio do Maranhão, localizada em São Luís – MA. Esse material tem aspecto pulverulento e cor escura, como pode ser visto na Figura 6. E sua caracterização segue nos itens 4.1 e 4.2 do capítulo de resultados.

Figura 6: Cinza volante de reator de leito fluidizado circulante

Fonte: acervo da autora, 2010

3.3. MÉTODOS

A primeira etapa da estrutura metodológica compreende a **CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO**. Para isso se faz necessário conhecer a fonte geradora e ainda obter a classificação segundo a norma de resíduos sólidos da ABNT, que determina os ensaios de análise dos extratos lixiviado e solubilizado para obtenção dessa classificação. Essas etapas estão dispostas nos itens 3.3.1 e 3.3.2.

3.3.1 Conhecimento da fonte geradora

Para levantar dados sobre a fonte geradora foram feitas visitas técnicas à área industrial da empresa geradora do resíduo. O objetivo das visitas foi conhecer as áreas operacionais da indústria para identificar o equipamento reator de leito fluidizado, responsável pela produção da cinza. Dados sobre o reator e sobre seu funcionamento, matéria-prima consumida, quantidade de resíduo gerado e outros dados, são de suma

importância para caracterizar o equipamento e entender como acontece o processo que gera o resíduo.

3.3.2 Análise dos extratos lixiviado e solubilizado da cinza

Os ensaios de lixiviação e solubilização fazem parte da análise química do resíduo. O objetivo é identificar quais são os elementos presentes na amostra. Dessa forma será possível identificar o nível de contaminação do resíduo e determinar sua classificação. Classificar um resíduo segundo as normas brasileiras é classificá-lo de forma a apontar se esse material pode apresentar, ou não, perigo ao meio ambiente e às pessoas. Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) a classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

A NBR 10004/2004 Resíduos sólidos – Classificação dá parâmetros para que seja possível comparar a quantidade de substâncias presentes no material analisado. Para identificar essas substâncias são utilizadas outras duas normas: a NBR 10005/2004 Obtenção do Extrato Lixiviado e a NBR 10006/2004 Obtenção do Extrato Solubilizado. São essas normas que estabelecem os procedimentos para identificar os elementos e substâncias presentes no resíduo. Sendo que as amostras do resíduo devem ser coletadas de acordo com a NBR 10007/2004 Amostragem. As quatro normas citadas acima formam a coletânea de normas de Resíduos Sólidos da ABNT. O principal objetivo dessa coletânea é classificar os resíduos em: perigosos (Classe I) ou não-perigosos (Classe II), de acordo com NBR 10005/2004. E ainda classificar os resíduos não-perigosos em: não-inertes (Classe II-A) ou em inertes (Classe II-B), de acordo com a NBR 10006/2004.

Para obtenção do extrato lixiviado o resíduo é misturado a uma solução de extração composta por ácidos, pois segundo a NBR 10005 (ABNT, 2004), lixiviação é o processo de determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução em meio extrator. Essa mistura é agitada mecanicamente durante 18 horas, num aparelho chamado extrator, nesse caso foi usado o equipamento da marca Millipore, conforme Figura 7.

Figura 7: Aparelho extrator para extrato lixiviado
Fonte: acervo da autora, 2010

Para o ensaio de solubilização o resíduo é misturado a água destilada ou deionizada e passa por agitação manual por cinco minutos, após essa etapa o recipiente é fechado com filme PVC e fica em repouso por sete dias em temperatura constante, conforme Figura 8.

Figura 8: Obtenção do extrato solubilizado
Fonte: acervo da autora, 2010

Após esses procedimentos, as duas soluções, tanto do lixiviado quanto do solubilizado, passam por filtragem, conforme Figura 9. Primeiro as soluções são filtradas em papel filtro simples e depois em membranas mais finas com o auxílio de um compressor de vácuo. Só então são adquiridos os extratos lixiviado e solubilizado, onde serão analisados os parâmetros presentes na NBR 10004/2004, segundo a 21ª edição da Standard Methods SW 846, de 2005.

Figura 9: Procedimento de filtragem dos extratos lixiviado e solubilizado
Fonte: acervo da autora, 2010.

Com a obtenção dos extratos, essas soluções passam a ser analisados como efluentes. Sendo assim, a norma SW 846 indica vários procedimentos, dependendo do parâmetro que está sendo analisado. Para identificar a presença dos metais, tanto o extrato lixiviado quanto o solubilizado, passam por um processo de digestão com ácido nítrico e clorídrico. Após a digestão os extratos passam pelo espectrofotômetro de absorção atômica. Por fim usa-se os volumes do início e do final do processo para calcular e obter os resultados, expressos em mg/L.

No caso do fluoreto, o primeiro passo é fazer uma destilação com ácido sulfúrico, depois a leitura é feita com reagente específico. O cianeto e os fenóis passam por destilação sem ácido e também são analisados com reagentes específicos. O objetivo da destilação é eliminar as interferências. Já o cloreto, os sulfatos e os surfactantes passam direto para a fase da adição de reagentes, cada um utiliza um reagente específico. O nitrato passa primeiro pela floculação com hidróxido de alumínio e posterior filtração. Já o sódio, primeiro passa pela fotometria de chama para depois ser analisado com seus reagentes. Todos os resultados são expressos em mg/L. E os procedimentos são os mesmos para a lixiviação e solubilização, a diferença é a quantidade limite para cada um dos parâmetros.

Após classificar a cinza volante, identificando os elementos presentes em sua composição, são também analisadas as matérias-primas utilizadas no reator. O carvão mineral, a areia e o calcário dolomítico também passam pelos ensaios de lixiviação e solubilização de acordo com os procedimentos já explanados.

Para a **CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO**, que compreende a segunda etapa da metodologia, são necessários nove ensaios que estão dispostos do item 3.3.3 ao item 3.3.10.

3.3.3 Difratometria de Raios-X

Segundo Ratti (2010.p 17) o uso de amostras cristalinas para difratar a radiação é a base da técnica de difração de raios-x. A partir daí a Lei de Bragg indica os planos cristalográficos e os espaçamentos interplanares da espécie mineral, sendo assim, com esse tipo de análise é possível identificar fases minerais presentes em amostras.

Esse ensaio é indicado porque na maior parte dos sólidos (cristais), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X. Ao incidir um feixe de raios X em um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, originando o fenômeno da difração. Ao se caracterizar argilominerais, a utilização da técnica de difração de raios X torna-se ainda mais indicada, pois uma análise química reportaria os elementos químicos presentes no material, mas não a forma como eles estão ligados. (ALBERS et al., 2002.p 34)

O ensaio foi realizado no Laboratório de Cristalografia do Instituto de Física de São Carlos-USP, com o difratômetro de raios-x da marca Rigaku Rotaflex, modelo RU200B. O objetivo do ensaio é identificar de forma minuciosa quais são os compostos que estão mais presentes na cinza, isso pode ser observado através dos picos longos apresentados nos gráficos apresentados nos resultados.

Para fazer a leitura no difratômetro, é necessário que a amostra esteja em partículas pequenas, a própria granulometria da cinza já foi suficiente para tornar possível essa leitura, mas no caso das matrizes solidificadas, essas foram fragmentadas e submetidas à trituração em moinho de bolas.

3.3.4 Granulometria

Realizado com base na NBR 7211/2005, o ensaio tem o objetivo de conhecer a granulometria da cinza volante, ou seja, entender como suas partículas estão divididas.

Com esse resultado é possível identificar se o material apresenta características mais próximas de agregados ou de aglomerantes, sendo possível ter uma idéia inicial de seu uso. Segundo Neville (1982.p 162) a granulometria dos agregados é importante, pois influencia em algumas características da argamassa, tal como a trabalhabilidade. A granulometria dos materiais que compõem uma argamassa é de suma importância, pois tem influência direta na hidratação e durabilidade dessas. O ideal é que as granulometrias sejam complementares, para que aconteça o empacotamento, fenômeno em que os poros deixados pelos materiais de maior fração granulométrica são preenchidos pelos de menor fração.

Empacotamentos com menor porosidade podem ser obtidos se os vazios existentes entre as partículas de uma dispersão forem preenchidos por partículas menores que os mesmos. Porém, caso sejam introduzidas partículas maiores que os vazios existentes, essas promoverão o surgimento de novos vazios, levando a um aumento na porosidade e redução da eficiência do empacotamento. (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009.p 27)

Para o ensaio são separadas duas amostras de mesma massa do material, que são colocadas no conjunto de peneiras e agitadas com o auxílio do agitador mecânico. São aferidas as massas do material retido em cada peneira e também no fundo. Os resultados são expressos em tabelas e gráficos.

3.3.5 Determinação de massa unitária e massa específica

Ter conhecimento da massa unitária do material é importante para a dosagem dos materiais em um traço. Para dosar em volume “é necessário saber qual a massa do agregado que ocupa um recipiente com capacidade unitária, esta massa é denominada unitária, e é usada para converter quantidades expressas em massa, em quantidades expressas em volume.” (NEVILLE, 1982.p 133).

O ensaio de massa unitária é feito de acordo com a NBR 7251/82 – Agregado em estado solto, determinação de massa unitária. A norma define massa unitária como o quociente da massa do agregado lançado no recipiente de acordo com o estabelecido na norma e o volume desse recipiente. O primeiro passo é obter o volume e a massa do recipiente vazio, tudo de acordo com os procedimentos especificados pela norma. Para

aferição da massa do resíduo, ele é lançado de uma altura específica (10 a 12 cm do topo do recipiente), a superfície é alisada com uma régua e é feita a pesagem. A massa do agregado solto é a diferença da massa do recipiente cheio e a massa do recipiente vazio. São necessárias três determinações e o resultado é a média dos resultados individuais obtidos.

Outra informação necessária para a dosagem de argamassas é a massa específica, definida por Mehta e Monteiro (1994.p 257) como a massa do material por unidade de volume incluindo os poros internos das partículas. O ensaio é realizado segundo a NM 23/2000, que define massa específica como sendo a massa da unidade de volume do material, o ensaio é feito utilizando o frasco de Le Chatelier, o líquido utilizado foi o querosene, pois caso a água fosse utilizada poderia acontecer alguma reação, causando o endurecimento da cinza.

3.3.6 Teor de finura do material

Esse ensaio é realizado com base na ABNT MB-3432/1991, que dita procedimentos para determinar a finura do cimento Portland. O ensaio é feito com base no material retido na peneira 75 μ m (nº 200). O objetivo é determinar o percentual, em massa, de material cujas dimensões de grãos são superiores a 75 μ m. Conhecer a finura do material é importante para entender qual será o comportamento do material quando colocado em argamassas, principalmente em relação à hidratação e empacotamento dos grãos.

O estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente. (OLIVEIRA et al, 2000 *apud* CASTRO e PANDOLFELLI, 2009)

Segundo Castro e Pandolfelli (2009.p 25) componentes finos e ultrafinos, com formato esférico têm sido adicionados às misturas tanto para facilitar o auto-adensamento quanto para garantir uma melhor compactação e preenchimento dos vazios existentes entre os grãos. “Quando as partículas menores ocupam os interstícios

entre as partículas maiores, o empacotamento é otimizado, diminuindo a porosidade do sistema.” (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009.p 27).

3.3.7 Superfície específica

O objetivo do ensaio é determinar a área do grão do material. Um dos métodos apontados para chegar a esse objetivo é o ensaio de permeabilidade de Blaine. Segundo a NBR NM 76/1998, que dita procedimento para execução do ensaio de Blaine, a determinação da superfície específica serve principalmente para checar a uniformidade da moagem do cimento. Segundo Neville (1982.p 23) no método de permeabilidade ao ar, a área da superfície de todas as partículas é medida diretamente. No caso da cinza volante estudada, o material de referência usado no ensaio foi o cimento Portland, sendo assim esperou-se que a área específica do material estivesse próxima desse valor.

Conhecidamente, em matrizes de cimento a água pode estar dividida em duas partes: a água que preenche os vazios e a água que fica na camada superficial formando um filme, e isso interfere na consistência das argamassas, principalmente as mais fluidas. Sendo assim, conhecer a superfície específica da cinza volante, como material que compõem uma matriz de cimento é necessário, pois “se a área específica do material for muito elevada, a quantidade total de água é aumentada devido ao aumento significativo de demanda de água na camada de superfície.” (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009.p 29)

3.3.8 Perda ao fogo

Para cimentos “a perda ao fogo indica até que ponto houve carbonatação e hidratação, da cal livre (CaO) e da magnésia livre devido à exposição do cimento ao ar” (NEVILLE, 1982.p 10). O autor aponta que, para cimentos nos trópicos o máximo permitido é de 4% de perda ao fogo. Já a NBR 12653/92 Materiais Pozolânicos, coloca que o máximo de perda ao fogo para as cinzas volantes de combustão de carvão é 6%. Um percentual maior de perda ao fogo pode indicar grande quantidade de material orgânico ou ainda a presença de grande quantidade de carbono. “Um produto da combustão do carvão, aluminosilicato tipo cinza volante, geralmente contém partículas de carbono residual. A quantidade de carbono é geralmente determinada pela perda ao fogo que

proporciona uma estimativa aproximada do valor real.”²¹ (HORNAIN, MIERSMAN and MARCHAND, 1992.p 22. Tradução da autora). E ainda segundo Hornain, Miersman e Marchand (1992.p 22 e 23) um alto teor de carbono na cinza volante influencia de maneira negativa nas propriedades do concreto, podendo aumentar a água requerida para hidratação e consequentemente influenciar na resistência mecânica.

O ensaio é realizado de acordo com a NBR NM 18/2004 – Cimento Portland, análise química, determinação de perda ao fogo.

3.3.9 Análise de pozolanicidade com cimento

O ensaio de pozolanicidade com cimento tem o objetivo de identificar se a cinza volante apresenta alguma atividade de pozolana quando colocada em argamassas feitas com cimento. Segundo Mehta e Monteiro (1994.p 220) a reação entre pozolana e hidróxido de cálcio é o que chamamos de reação pozolânica. As pozolanas são, originalmente, rochas vulcânicas que apresentam alto teor de sílica (SiO_2) e que tem a capacidade de reagir com o cálcio presente no cimento, acontecendo aí uma reação cimentante. Segundo Termkhajornkit (et al, 2006.p 781) a reação pozolânica da cinza volante pode fazer com que o concreto que contenha cinza seja mais durável, pois os espaços vazios são preenchidos pelo produto de hidratação, resultando em uma redução da permeabilidade.

Para esse ensaio foi adotada a NBR 5752/1992, que indica a produção de duas argamassas: argamassa A (padrão), com cimento, areia e água; e a argamassa B, onde são colocados 35% do material que está sendo testado. O passo seguinte é calcular a quantidade de material necessário para moldar quatro corpos-de-prova de cada argamassa. Esses corpos-de-prova são submetidos ao ensaio de resistência à compressão com idade de 28 dias. Os resultados médios em MPa são utilizados nos cálculos e o resultado é expresso em percentual.

²¹ “A product of the combustion coals, the aluminosilicate type fly ash often contains residual carbon particles. The quantity of carbon is generally determined by the loss on ignition which provides a rough estimate of the true value.”

3.3.10 Análise de pozolanicidade com cal

O método de ensaio é descrito pela NBR 5751/1992 e o parâmetro é colocado pela NBR 12653/1992. O ensaio, a exemplo do que acontece com a pozolanicidade com cimento, também começa com a determinação do índice de consistência que deve ser de 225 (± 5) mm, para isso foi feito o teste de consistência na *flow table*. Com esse resultado é possível calcular a quantidade de material necessário para moldar os corpos-de-prova, que devem ser moldados em formas com tampa provida de rosca, para não perder umidade. Esses corpos-de-prova curam durante 7 dias nas próprias formas em condições controladas de temperatura, após esse período são submetidos ao ensaio de resistência à compressão. Para que o material seja considerado pozolânico a média dos resultados dos três corpos-de-prova deve obter no mínimo 6 MPa.

Na terceira etapa da estrutura metodológica está o **ESTUDO DAS COMPOSIÇÕES PRELIMINARES**. Nessa etapa são produzidas as matrizes de cimento, cinza e areia, utilizando a cinza volante como parte do aglomerante. Para esses estudos preliminares foram delimitadas as análises mecânica e de eficiência de estabilização. A análise mecânica será feita com o ensaio de resistência à compressão e a análise de eficiência de estabilização será feita com os ensaios de difratometria de raios-x, lixiviação e solubilização. O objetivo dessa etapa é analisar qual é o comportamento mecânico e químico das matrizes onde a cinza foi utilizada como aglomerante, para tanto são produzidas matrizes com percentuais diferentes de cinza em sua composição.

3.3.11 Resistência à compressão – análise mecânica da matriz

Nessa etapa a estratégia foi utilizar a cinza como aglomerante, substituindo parte do cimento, por isso o ensaio de resistência à compressão é realizado de acordo com a NBR 7215/1996 – Cimento Portland – Determinação de resistência à compressão. Para testar uma variação significativa foram produzidas argamassas no traço 1:3 (uma parte de aglomerante para três partes de agregado), sendo que a parte de aglomerante foi composta com cimento e cinza com percentuais variados, adotados três bem distintos: 25%, 50% e 75% de cinza no total de aglomerante. Sendo assim, a quantidade de

aglomerante é sempre um total de cimento mais cinza. A quantidade de material necessário (em massa) para os ensaios pode ser vista na Tabela 8.

Material	Massa necessária (g)			
	Argamassa P (padrão)	Argamassa A (50% CV-50% CP)	Argamassa B (25% CV-75% CP)	Argamassa C (75% CV-25% CP)
Cimento CP-III-40 RS	624	312	468	156
Cinza Volante	-	312	156	468
Areia normal IPT	1872	1872	1872	1872
Água	300	300	300	300

CV: cinza volante

CP: cimento Portland

Tabela 8: Planilha de quantidades – ensaio de determinação de resistência à compressão

Fonte: acervo da autora, 2010

Com a quantidade de materiais definida, a etapa seguinte é moldar os corpos-de-prova. Os materiais são misturados e logo após o amassamento, moldados nas formas de 50X100 mm. A relação água/aglomerante de 0,48 é mantida por determinação da norma. Após moldagem, os corpos-de-prova devem ser submetidos à cura inicial por 24 h em câmara úmida. Em seguida são desmoldados, identificados e entram em processo final de cura imersos em tanque com água colocado na câmara úmida, como pode ser visto na Figura 10, onde ficam até os 28 dias de cura para então serem submetidos ao ensaio de compressão.

Figura 10: Desmoldagem, identificação e cura – corpos-de-prova – ensaio de resistência à compressão.

Fonte: acervo da autora, 2010

Após o período de cura os corpos-de-prova são submetidos à compressão numa prensa eletro hidráulica, os resultados são expressos em MPa de acordo com a NBR 7215/1996. Os resultados são comparados de acordo com o parâmetro, que é o resultado da amostra padrão, sem a adição de cinza. Dessa forma é possível identificar o desempenho mecânico das matrizes produzidas com cinza, sendo esta utilizada como parte do aglomerante.

3.3.12 Eficiência de estabilização das matrizes

Para verificar se aconteceu a encapsulação, seja ela química ou física, são feitos novamente os ensaios de análise dos extratos lixiviado e solubilizado, conforme item 3.3.2, e ainda as análises de difratometria de raios-x, conforme o item 3.3.3. Para possibilitar a análise em matrizes endurecidas, os elementos passam por processo de trituração em moinho de bolas, pois o procedimento para obtenção dos extratos é feito a partir de materiais que apresentam granulometria passante pela peneira 9,5 mm e a difração de raios-x só é possível em materiais de granulometria bem fina. Nas análises dos extratos lixiviado e solubilizado serão identificados novamente os elementos de acordo com os parâmetros da NBR 10004/2004. Comparando os resultados da cinza *in natura* com os resultados das matrizes é possível identificar se os elementos foram estabilizados/solidificados, determinando a eficiência de estabilização das matrizes de cimento Portland, de acordo com a fórmula 1.

$$E_{est} = \frac{C_r - C_m}{C_r} \times 100 \quad [1]$$

Onde:

E_{est} = Eficiência de estabilização na matriz solidificada (%)

C_r = Concentração do elemento no resíduo *in natura* (mg/L)

C_m = Concentração do elemento na matriz solidificada (mg/L)

Já a análise das difrações de raios-x, vem contribuir para identificar os compostos presentes nas amostras, identificando as reações entre os elementos presentes no cimento Portland e na cinza volante.

Na quarta etapa da metodologia está a **ADEQUAÇÃO DAS MATRIZES** compostas com cinza. Para isso, é definida uma nova finalidade para utilização da cinza e também, novos traços, a fim de utilizar o resíduo da maneira mais adequada. Essas composições são novamente avaliadas, porém agora de maneira mais completa com análises mecânicas, químicas e físicas.

3.3.13 Resistência à compressão – adequação das matrizes

Para essa etapa ficou determinado que a cinza volante seria utilizada como agregado. Assim, foram definidos três traços iniciais, 1:1, 1:3 e 1:5, com o objetivo de utilizar o máximo possível de resíduo. Essa escolha está baseada no raciocínio de avaliar um traço que é comum, que seria o traço 1:3, que é adotado pelas normas de ensaio de cimento. Adotando então duas variações, uma para mais e outra para menos, que seriam os traços 1:1 e 1:5.

O ensaio inicia com a determinação das massas para cada traço e posterior pesagem dos materiais. A quantidade de água a ser adicionada nas argamassas seria o suficiente para manter a consistência ideal para prensagem, consistência seca, já que o objetivo é utilizar o material para moldar blocos prensados. Essa consistência seca atingirá um ponto que será verificado através do tato, quando apresentar coesão sem encharcamento, como pode ser visto na Figura 11. A cura dos corpos-de-prova é feita em tanques, submersos em água, acondicionados na câmara úmida. A aferição da resistência à compressão é feita aos 28 dias, e os resultados são expressos em MPa.

Figura 11: Argamassa com características para prensagem e moldagem dos corpos-de-prova
Fonte: acervo da autora, 2010

De acordo com os resultados dessa fase de ensaios preliminares, será eleito um traço com percentual definido de cinza, aquele que apresente características mecânicas satisfatórias. Essa matriz escolhida será submetida à análise de eficiência de estabilização, início e fim de pega e permeabilidade ao ar. E após esses resultados será iniciada a fase de produção dos blocos.

3.3.14 Eficiência de estabilização da matriz adequada

O objetivo dessa etapa da investigação experimental é averiguar a capacidade de estabilização/solidificação, da matriz eleita para moldar os blocos prensados. Através do ensaio de resistência à compressão na fase de adequação, um traço será eleito e analisado do ponto de vista químico, verificando sua capacidade de estabilizar/solidificar os elementos nocivos à saúde, identificados na cinza *in natura* através do ensaio de solubilização. Comparando os resultados das solubilizações da cinza *in natura* e da matriz com cinza será possível identificar qual a capacidade de estabilização da matriz eleita, observada através da mitigação dos elementos nocivos presentes no resultado da cinza volante.

Para possibilitar a análise em matrizes endurecidas, novamente os elementos passaram por processo de trituração em moinho de bolas, e o material passante pela peneira 9,5mm é utilizado para obtenção do extrato solubilizado. Conforme já descrito no item 3.3.2.

3.3.15 Tempo de pega da matriz adequada

O objetivo do ensaio é determinar o tempo de pega da pasta produzida com cimento e cinza. Faz-se necessário esse dado, pois a literatura aponta que adições incorporadas ao cimento tendem a retardar o início e o fim de pega das pastas de cimento. Sendo o CP III, um tipo de cimento que já apresenta um início de pega um pouco maior que o dos outros tipos de cimento, o ensaio torna-se ainda mais necessário, para entender como essa composição se comportará na produção dos blocos prensados. Para fazer o ensaio são utilizados os procedimentos presentes na NBR NM 65/2003 Cimento Portland – Determinação de tempo de pega, utilizando o aparelho de Vicat. Para esse

ensaio foram feitas duas pastas, uma utilizando apenas o cimento CP III e outra utilizando cimento e cinza na mesma proporção da matriz adequada. Essas pastas são produzidas numa consistência normal de acordo com a NBR NM 43/2002. Com essas pastas de consistência normal são feitos os ensaios com o aparelho de Vicat, que utiliza dois tipos de agulhas (uma para início de pega e outra para fim de pega) que penetram em um tronco de cone preenchido com as pastas para que as leituras sejam feitas. A norma determina que o tempo de início de pega é o intervalo entre a produção da pasta até o momento em que a agulha de Vicat penetra 4 mm (± 1) da placa base. E o fim de pega é o intervalo de tempo entre a produção da pasta até o momento em que a agulha de Vicat penetra 0,5 mm na pasta.

3.3.16 Permeabilidade ao ar da matriz adequada

O objetivo desse ensaio é verificar a porosidade das matrizes cimentícias, para aferir sua estanqueidade e sua permeabilidade. Segundo Scheidegger²² (1974 *apud* INNOCENTINI e PANDOLFELLI, 1999) o conceito de permeabilidade surge naturalmente quando um fluido é forçado a atravessar um meio poroso. A complexa interação entre o fluido e o canal poroso causa uma transformação na energia do sistema, geralmente associada à diminuição da pressão exercida pelo fluido.

Sendo assim, o ensaio mostra o caminho dos poros e como eles se comunicam, esse dado é importante para entender o comportamento, estanque ou não de um elemento construtivo produzido com a cinza. O resultado desse ensaio pode ainda contribuir para avaliar a durabilidade dessa argamassa, pois “a estimativa de durabilidade de argamassas e concretos está diretamente vinculada à sua permeabilidade, uma vez que determina a facilidade com que gases ou líquidos agressivos penetram e atacam suas estruturas.” (PABLOS, 2008.p 53). “Em um concreto de cimento Portland, poros existem dentro dos próprios agregados, na interface pasta/agregado e na pasta de cimento. É por meio desses vazios que os agentes agressivos (gases, líquidos e sólidos dissolvidos) se movem através da pasta de cimento endurecida.” (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009.p 28)

²² SCHEIDEGGER, E. *The physics of flow through porous media*. University of Toronto Press, 3rd Edition, 353p. 1974.

Para esse ensaio foi utilizado o permeâmetro (Figura 12), um aparelho que utiliza ar comprimido para testar a permeabilidade nos materiais. Para executar o ensaio são necessárias amostras em forma de disco, nesse caso foram utilizados corpos-de-prova de 50x100 mm, serrados com 25mm de espessura.

Figura 12: Permeâmetro – aparelho para ensaio de permeabilidade ao ar.
Fonte: acervo da autora, 2011.

As amostras são colocadas no aparelho num compartimento vedado e então é dada a carga de ar comprimido. Em paralelo, são feitas as leituras de pressão, volume e tempo. Entende-se que, quanto maior for o deslocamento maior é a permeabilidade. Sendo os resultados expressos de acordo com as equações Darciana e não-Darciana. Esses resultados são apresentados em gráficos comparativos entre uma amostra branca, produzida sem o resíduo, e uma amostra da matriz adequada. Esse método é baseado na ASTM C577/96 – *Standard Test Method for Permeability of Refractories*.

Na quinta etapa da metodologia está a **PRODUÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS**. Após conferir o desempenho da matriz adequada, essa composição é utilizada para produzir os blocos prensados.

3.3.17 Processo de produção dos blocos prensados

De posse de todos os resultados levantados durante a investigação experimental do resíduo e das matrizes, principalmente no que diz respeito ao desempenho e

características da argamassa com adição de cinza volante, passamos então para a quinta etapa da metodologia, propondo a produção de um componente para a construção civil. O componente escolhido foi o bloco prensado, primeiro por ser um componente de construção comum e de grande utilização na construção civil, depois por ser também comum a aferição de suas propriedades e desempenho. A escolha da técnica da prensagem se justifica por ser um processo produtivo que não necessita da queima do bloco, tornando o processo mais limpo, mais fácil e com menos emissão de gases poluentes.

A produção dos blocos foi feita com uma prensa eletro hidráulica com capacidade de prensagem de três toneladas, moldando dois blocos por vez, equipamento existente na mini usina de produção de blocos prensados do Laboratório de Construção Civil do Instituto de Arquitetura e Urbanismo – USP. A argamassa foi produzida em ponto de prensagem, consistência seca, adotando a quantidade de água já encontrada nos estudos anteriores e ajustada à capacidade da prensa.

Figura 13: Mini usina para produção de blocos prensados – Laboratório de Construção Civil – IAU.

Fonte: Acervo da autora, 2011.

A norma que fixa os parâmetros de resistência à compressão e absorção de água é a NBR 8491/1984 – Tijolo maciço de solo-cimento – Especificações. Essa norma fixa as exigências para blocos destinados à execução de alvenaria das obras de construção civil. Das normas brasileiras, essa é a mais indicada para avaliar blocos produzidos com adição de resíduos, pois é específica para blocos produzidos com cimento Portland, ou seja, matrizes de cimento tal como a matriz produzida com cinza.

Na sexta e última etapa da metodologia está a **DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS**, com o objetivo de aferir as características mecânicas, físicas e químicas dos blocos prensados. Os três ensaios que compreendem essa etapa estão dispostos do item 3.3.18 ao item 3.3.20.

3.3.18 Blocos - Determinação de resistência à compressão

Com o objetivo de aferir a qualidade mecânica dos blocos produzidos a partir da matriz de cimento Portland com cinza, foi executado o ensaio de determinação de resistência à compressão conforme a NBR 8492/1984, Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água - Método de ensaio. Para esse ensaio são necessários 10 blocos especialmente preparados conforme procedimento detalhado pela norma. Após essa preparação os corpos-de-prova são imersos em água durante 24h e devem ser retirados logo antes do ensaio. A força da prensa deve obedecer a razão de 50 Kgf/s. O resultado é expresso em MPa, encontrando a média da amostra. A NBR 8491/1984 exige que a média de resistência dos blocos seja maior que 2 MPa.

3.3.19 Blocos - Determinação de absorção de água por imersão

Esse dado define o volume dos poros. O ensaio é realizado de acordo com a norma NBR 8492/1984, Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água - Método de ensaio. E a norma NBR 8491/1984 fixa os parâmetros mínimos exigidos: a absorção média não deve passar dos 20% e os valores individuais de cada bloco não podem ultrapassar 22% de absorção.

O ensaio é executado a partir de três corpos-de-prova (blocos), e consiste na aferição das massas dos blocos, em estado seco e em estado saturado. O resultado é expresso em percentual. Na primeira etapa os blocos são colocados em estufa até constância de massa. Após a aferição da massa em estado seco os blocos são imersos em tanque com água durante 24h, e é feita nova aferição de massa em estado saturado. Com esses dados é possível chegar ao resultado percentual médio.

3.3.20 Análise da eficiência de estabilização dos blocos

Para verificar a eficiência de estabilização dos blocos é repetido o ensaio de análise do extrato solubilizado. Os blocos são triturados e peneirados na peneira 9,5mm. A partir desse material é retirado o extrato solubilizado (cujos procedimentos de ensaios já estão descritos no item 3.3.2), que é analisado de acordo com os parâmetros da NBR 10004/2004, sendo possível identificar elementos, presentes na amostra, que ultrapassem o limite da norma. Comparando esse resultado ao resultado da análise da cinza *in natura* é possível identificar se o bloco foi capaz de estabilizar/solidificar os elementos nocivos presentes na cinza, estabelecendo sua eficiência de estabilização por solidificação, através da fórmula 1, já citada no item 3.3.12.

Capítulo

Resultados

4.1. CLASSIFICAÇÃO DA CINZA *IN NATURA*

4.1.1 Conhecimento da fonte geradora

O resíduo sólido industrial utilizado na pesquisa é a cinza volante residual do funcionamento de um reator de leito fluidizado circulante, utilizado para gerar energia para produção de alumina e alumínio na ALUMAR – Consórcio Alumínio do Maranhão. As dependências da indústria ficam localizadas na área industrial de São Luís - MA e se dividem em três partes: porto, refinaria e redução. Com a implantação do reator de leito fluidizado circulante no início de 2010, a produção anual de resíduo, que era de 20.000 t, tende a dobrar.

O equipamento em questão é alimentado com três materiais: carvão mineral, areia e calcário dolomítico. O principal material é o carvão mineral, essa matéria-prima tem duas origens, ou é comprado das minas do sul do Brasil ou é importado da Austrália ou da Colômbia, mas a indústria tem preferido comprar da Colômbia, pois o teor de carbono é mais alto, e segundo os técnicos responsáveis pelo reator, isso contribui para a produção de energia. A areia tem a função de auxiliar na recirculação do reator e o calcário tem a função de minimizar gases tóxicos. Segundo Morita (2009.p 65) o tipo dolomítico possui influência na emissão de gases como o dióxido de enxofre (SO_2), ou seja, o calcário do tipo dolomítico tem a função de adsorver esse gás que é gerado no momento da queima no reator. Nesse processo não acontece a calcinação do calcário, que é a principal característica na produção de cimento.

Num reator de leito fluidizado, a cinza volante é separada pelos ciclones. Andrade (1991.p 12) descreve o processo da seguinte maneira: ao flutuar em direção à chaminé, a cinza volante é coletada mecanicamente por ciclones e precipitadores eletrostáticos. A cinza é então retirada dos coletores, onde já sofreu um processo de resfriamento por intermédio de parafusos transportadores, e é levada até o equipamento pneumático que a conduzirá até o silo de armazenagem.

No processo gás-sólido em um leito fluidizado circulante, partículas sólidas entram na coluna principal, onde encontram um fluxo de ar ascendente que as transporta em direção ao ciclone. Nesse dispositivo, as partículas são separadas da corrente de gás, retornando ao fundo da coluna principal através de uma válvula de recirculação, que fica

localizada na base da coluna de recirculação. Forma-se assim um ciclo, onde as partículas ficam circulando até que atinjam, em função das reações químicas ou em função do atrito no interior do sistema, um diâmetro inferior ao diâmetro de corte do ciclone quando deixam o sistema juntamente com o fluxo gasoso. (BASU²³, 2006 *apud* MORITA, 2009.p 8). As partículas de diâmetro inferior, nada mais são do que a mistura dos materiais que entraram no reator e que agora se transformam em partículas pulverizadas, ou seja, é a cinza volante. Agregado ao sistema do reator tem o sistema de coleta do resíduo, após a coleta o material é transportado para os pátios de estocagem. O fluxograma simplificado desse processo pode ser visto na Figura 14.

Figura 14: Fluxograma simplificado do processo.
Fonte: acervo da autora, 2010

Conforme visita técnica feita em outubro de 2009 ao Laboratório de Térmica e Fluidos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, o funcionamento de um reator de leito fluidizado circulante tem basicamente quatro etapas: a primeira etapa é a ignição, que acontece através de sistemas auxiliares; a segunda etapa é a adição do inerte, ou seja, da areia, que garante a fluidização e a recirculação dos materiais; a terceira etapa é a adição do carvão mineral, principal combustível do reator; a quarta etapa é adicionar uma mistura de carvão mineral e calcário dolomítico, isso para minimizar os gases poluentes.

²³ BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL. United States, 2006, 473 p.

Na refinaria são produzidas 1,5 milhões de toneladas por ano de alumina, com a ampliação da indústria (que ocorreu no ano de 2009) esse número passará para 3,5 milhões de toneladas por ano. Na redução são produzidos 440 mil toneladas de alumínio por ano. Para manter essa produção, o reator gera 20 mil toneladas de resíduo por ano. E para ampliar a capacidade de produção da empresa, foi instalado esse novo reator de leito fluidizado circulante. Sendo assim, estima-se que a produção de resíduo poderá aumentar em grandes proporções. Esse resíduo não é utilizado pela indústria em seu processo produtivo, mas tem destino certo em pátios de disposição final, devidamente construídos para esse fim contando com todo monitoramento ambiental necessário.

4.1.2 Análise dos extratos lixiviado e solubilizado da cinza *in natura*

Os ensaios para classificação da cinza volante foram realizados no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC-USP. Na análise do extrato lixiviado do resíduo em estudo, todos os elementos identificados ficaram dentro dos limites exigidos pela norma, atendendo então ao anexo F (concentração – limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação) da NBR 10004/2004, e não estando presente nenhum elemento do anexo D, que trata de substâncias agudamente tóxicas. Algumas substâncias do anexo E, que trata de substâncias tóxicas, foram identificadas no resíduo, porém todas elas dentro do limite permitido, conforme Tabela 9. Sendo assim, é possível afirmar que o resíduo é classificado como Classe II, não-perigoso. Outro dado identificado na análise é o pH do lixiviado, nesse caso o resultado demonstra uma solução ácida com pH de 5,84.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO LIXIVIADO mg/L	RESULTADO
ARSÊNIO	1,0	LD
BÁRIO	70,0	13,64
CÁDMIO	0,5	0,085
CHUMBO	1,0	0,61
CROMO TOTAL	5,0	LD
FLUORETOS	150,0	0,38
MERCÚRIO	0,1	LD
PRATA	5,0	0,01
SELÊNIO	1,0	LD

LD=Limite de detecção

Tabela 9: Resultados – lixiviação – cinza *in natura*

Fonte: Laboratório de Saneamento-EESC, 2010. Adaptado pela autora

Já na análise do extrato solubilizado do resíduo, foram detectados alguns elementos que ultrapassaram os limites permitidos pelo anexo G (Padrões para o ensaio de solubilização) da NBR 10004/2004. Os elementos: alumínio, bário, cádmio, chumbo, fenóis, sódio e sulfatos, ultrapassaram os limites dados pela norma, como pode ser visto na Tabela 10, onde estão marcados os parâmetros que ultrapassaram os limites. Por esse motivo o resíduo é classificado como Classe II-A, não-perigoso e não-inerte. O pH do extrato solubilizado apresenta uma solução alcalina com 8,99 de pH.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO
ALUMÍNIO	0,2	18,66
ARSÊNIO	0,01	LD
BÁRIO	0,7	12,49
CÁDMIO	0,005	0,174
CHUMBO	0,01	1,44
CIANETOS	0,07	LD
CLORETOS	250	3
COBRE	2	0,012
CROMO TOTAL	0,05	0,022
FENÓIS TOTAIS	0,01	0,042
FERRO TOTAL	0,3	0,2
FLUORETOS	1,5	0,32
MANGANÊS	0,1	0,038
MERCÚRIO	0,001	LD
NITRATOS	10	0,64
PRATA	0,05	0,008
SELÊNIO	0,01	LD
SÓDIO	200	388,4
SULFATOS	250	3400
SURFACTANTES	0,5	LD
ZINCO	5	0,166

LD=Limite de detecção

Tabela 10: Resultados – solubilização – cinza in natura

Fonte: Laboratório de Saneamento-EESC, 2010. Adaptado pela autora

Diante do resultado da solubilização do cinza volante *in natura*, fez-se necessário analisar também a matéria-prima que compõe a cinza, ou seja, os materiais que alimentam o reator de leito fluidizado circulante.

4.1.3 Classificação das matérias-primas

Para classificar as matérias-primas foram analisadas quatro amostras: areia, calcário dolomítico, carvão mineral tipo 001 e carvão mineral tipo Sizedt. Todas as

amostras passaram pelos ensaios de lixiviação e solubilização. Todos foram classificados como Classe II (não-perigosos), pois na análise do extrato lixiviado nenhum parâmetro ultrapassou o limite imposto pela norma. Já na análise do extrato solubilizado, todas as matérias-primas apresentaram substâncias fora dos limites, sendo então, todas classificadas como Classe II-A (não-perigoso e não-inerte).

A Tabela 11 apresenta o resultado das solubilizações das quatro amostras, onde é possível observar quais elementos ultrapassaram o limite máximo no extrato solubilizado: alumínio, cádmio, chumbo, fenóis totais, ferro total e manganês. Sendo que, nenhum desses elementos foi detectado fora do limite em todas as amostras.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO AREIA	RESULTADO CALCÁRIO	RESULTADO CARVÃO 001	RESULTADO CARVÃO SIZEDT
ALUMÍNIO	0,2	0,43	3,35	0,12	0,64
ARSÊNIO	0,01	LD	LD	LD	LD
BÁRIO	0,7	LD	0,05	0,08	0,03
CÁDMIO	0,005	0,005	0,004	LD	0,008
CHUMBO	0,01	0,05	0,12	0,01	0,02
CIANETOS	0,07	LD	LD	LD	LD
CLORETOS	250	1,4	1,6	1,4	2,5
COBRE	2	LD	0,004	LD	LD
CROMO TOTAL	0,05	LD	0,05	0,033	LD
FENÓIS TOTAIS	0,01	0,038	0,029	LD	0,07
FERRO TOTAL	0,3	0,526	0,132	0,454	0,79
FLUORETOS	1,5	0,07	0,24	0,1	LD
MANGANÊS	0,1	LD	0,006	0,389	LD
MERCÚRIO	0,001	LD	LD	LD	LD
NITRATOS	10	0,36	0,94	0,37	0,27
PRATA	0,05	LD	0,005	LD	LD
SELÊNIO	0,01	LD	LD	LD	LD
SÓDIO	200	0,9	2,1	2,6	27,2
SULFATOS	250	1	13	105	68
SURFACTANTES	0,5	LD	LD	LD	0,5
ZINCO	5	0,014	0,01	0,051	0,044

LD: Limite de detecção

Tabela 11: Resultados solubilizações matérias-primas do reator
Fonte: Laboratório de Saneamento, adaptado pela autora, 2011.

4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO

4.2.1 Difratometria de Raios-x

O ensaio foi realizado no Laboratório de Cristalografia do Instituto de Física de São Carlos-USP, com o difratômetro de raios-x da marca Rigaku Rotaflex, modelo RU200B.

O objetivo do ensaio é identificar os compostos químicos mais presentes na cinza volante, isso pode ser observado através dos picos longos apresentados no gráfico, conforme Figura 15. Através desse difratograma foi possível identificar os seguintes compostos: Quartzo, mas conhecido como sílica (SiO_2) ou dióxido de silício; Moganita, outro tipo de sílica; Gismondite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), que também apresenta sílica em sua composição; Tridimita (2OH SiO_2), mais uma vez a presença da sílica. E ainda, a Gipsita, mas conhecido como gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou sulfato de cálcio hidratado; Hematita (Fe_2O_3), óxido de ferro; e Berlinite (AlPO_4) ou ortofosfato de alumínio.

Figura 15: Difratograma de raios-x da cinza volante²⁴
Fonte: IFSC-FFI, 2010

4.2.2 Granulometria

O resultado mostrou que a maioria das partículas é muito fina, quase um pó, pois um grande percentual da amostra passou pela peneira 0,15 mm e ficou depositada no fundo, conforme consta na Tabela 12. Outros dados relevantes são: módulo de finura de 0,11 e diâmetro máximo de 0,15 mm.

²⁴ Difratograma de raios-x da Cinza in natura – Anexo E.

Peneira # (mm)	Amostra 1=500g		Amostra 2=500g		% médios	
	M. Retida	% Retida	M. Retida	% Retida	% Retida	% R. Ac.
9.5	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
6.3	0,0	0,0%	0,6	0,1%	0%	0%
4.75	0,9	0,2%	0,5	0,1%	0%	0%
2.36	1,5	0,3%	2,3	0,5%	0%	1%
1.18	1,9	0,4%	2,1	0,4%	0%	1%
0.6	2,5	0,5%	2,6	0,5%	1%	2%
0.3	2,1	0,4%	2,1	0,4%	0%	2%
0.15	16,2	3,3%	16,0	3,3%	3%	5%
Fundo	462,6	94,9%	464,8	94,7%	95%	100%
Soma	487,7	100,0%	491,0	100,0%	100%	111%
Diâmetro máximo característico:					0.15 mm	
Módulo de finura:					0,11	

Tabela 12: Granulometria da cinza volante

Fonte: LCC, 2010

Nas duas determinações do ensaio, mais de 94% da massa ficou retida no fundo das peneiras, sendo a média de 95%. Outro dado importante é o “módulo de finura, definido pela soma das porcentagens acumuladas retidas nas peneiras [...]. O valor do módulo de finura é tanto maior quanto mais grosso o agregado.” (NEVILLE, 1982.p 160). Com os dados de módulo de finura da cinza 0,11, aliado ao diâmetro máximo característico de 0.15 mm, foi possível identificar a possibilidade de utilizar o material como *filler*.

4.2.3 Massa unitária e massa específica

Para massa unitária da cinza volante, o resultado encontrado pela média simples de três determinações foi 0,57g/cm³. Já para massa específica, o resultado obtido pela média de dois ensaios consecutivos foi 2,28g/cm³, o que pode classificar a cinza como um agregado, pois esses variam entre 2 e 3g/cm³.

4.2.4 Teor de finura do material

O resultado do ensaio determinado pela MB-3432/1991 é expresso em percentual. O índice de finura encontrado para a cinza volante foi 13,73%. Dessa forma pode-se afirmar que mais de 80% da amostra é mais fina que 75µm, ou seja, passa pela peneira nº 200. Esse resultado pode ser visto como um aspecto positivo, já que partículas menores resfriam mais rapidamente, e assim podem apresentar maior teor vítreo. Mas

também, pode ser visto como um aspecto negativo, pois partículas muito finas podem interferir na coesão da argamassa.

4.2.5 Superfície específica

O resultado da análise apontou que a superfície específica da cinza em questão é $5650 \text{ cm}^2/\text{g}$. Se comparada com a superfície específica do cimento que está sendo utilizado, que é de $4005 \text{ cm}^2/\text{g}$ ²⁵, é possível identificar que a cinza volante é mais finamente dividida que um cimento. O ensaio foi executado pelo Laboratório CESP de Engenharia Civil, documento disponível no Anexo D.

4.2.6 Perda ao fogo

A amostra analisada estava com 2,04% de umidade e apresentou perda ao fogo de 30%. Característica essa que descaracteriza esse resíduo como material pozolânico, pois a NBR 12653/1992, que dita parâmetros para materiais pozolânicos, estabelece como exigência química a perda ao fogo, para cinzas volantes, de no máximo 6%.

4.2.7 Análise da pozolanicidade com cimento

O ensaio inicia com a determinação do índice de consistência, que precisa ser de $225 (\pm 5)$. O ensaio de consistência é baseado na NBR 7215/1996, ensaio de espalhamento com o uso da *flow table*, conforme Figura 16. A consistência estabelecida pela norma foi atingida com 180,5g de água na argamassa composta de cimento, areia e água.

Figura 16: Ensaio de consistência – espalhamento com uso da *flow table*

Fonte: acervo da autora, 2010

²⁵ Informação cedida pelo fabricante do cimento, conforme Anexo A.

O segundo passo é calcular a quantidade de material necessário para moldar quatro corpos-de-prova de cada argamassa. A relação água/aglomerante de 0,85 foi mantida para as duas argamassas. As quantidades de areia e cimento foram calculadas a partir da norma e a quantidade de cinza volante foi calculada com o auxílio do dado de densidade, ou massa específica do cimento e da cinza volante (dado já obtido em ensaio anterior). A cinza deveria substituir 35% da quantidade de cimento, mas para que as densidades divergentes dos dois materiais não induzam a resultados errôneos, esse valor é multiplicado pelas densidades conforme recomenda a NBR 5752/1992. Dessa forma chegou-se às quantidades necessárias e essas estão dispostas na Tabela 13.

Material	Massa necessária (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento CP III-40	416	270
Cinza Volante	-	105,2
Areia normal IPT	1248	1248
Água	241	241

Tabela 13: Quantidade dos materiais – Ensaio de pozolanicidade com cimento.

Fonte: NBR 5752, 1992. Adaptado pela autora.

O terceiro passo é compor as argamassas e moldar os corpos-de-prova. Os materiais foram devidamente pesados e separados, conforme Figura 17. O amassamento foi feito de forma mecânica e os corpos-de-prova foram moldados logo após amassamento seguindo recomendações da norma.

Figura 17: Materiais para ensaio de pozolanicidade com cimento.

Fonte: acervo da autora, 2010.

Após moldagem, os corpos-de-prova, de 50 X 100 mm, passaram por processo de cura em câmara úmida durante 28 dias e foram submetidos ao ensaio de determinação

de resistência à compressão segundo a NBR 7215/1996, para isso foi utilizada uma prensa do tipo eletro hidráulica.

Com o resultado médio do ensaio de resistência, conforme Tabela 14, é calculado o índice de pozolanidade dado em percentual.

Traços	Corpo de prova	IDADE DE RUPTURA
cimento/cinza		28 dias (Mpa)
Referência	1	28,3
	2	25,2
	3	27,8
Média		27,1
35% cinza volante	1	17,8
	2	17,7
	3	17,3
Média		17,6

Tabela 14: Ensaio de pozolanidade de cimento – Resistência à compressão
Fonte: acervo da autora, 2010.

O índice de pozolanidade resultante foi 64,94%. Segundo a NBR 12653/92, a cinza volante é um pozolana artificial, ou seja, é um material proveniente de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica. E para considerar que esse tipo de material seja pozolânico, uma das exigências físicas impostas pela norma é que o material apresente no mínimo 75% de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias.

4.2.8 Análise de pozolanidade com cal

Seguindo o que estabelece a NBR 12653, especificação para materiais pozolânicos, foi executado o ensaio de pozolanidade com cal para verificar a reação entre a cal e a cinza. Como o ensaio com cimento não atingiu a meta estabelecida por norma, mas apresentou um percentual alto de pozolanidade, havia a possibilidade de acontecer a reação com a cal. A análise inicia com o ensaio de consistência, que foi adquirida com 255g (consistência média de 229 mm). A quantidade de material para moldar três corpos-de-prova é determinada por norma de acordo com as densidades dos

materiais envolvidos, no caso cal e cinza. A Tabela 15 apresenta a quantidade necessária para executar o ensaio fazendo três corpos-de-prova.

Material	Massa (g)
Cal	104
Cinza volante	212
Areia normal do IPT (234 de cada fração)	936
Água	255

Tabela 15: Quantidade de material para ensaio de pozolanicidade com cal.

Fonte: acervo da autora, 2010.

A moldagem foi feita logo após produção da argamassa, e os corpos-de-prova passaram pelo processo de cura na própria fôrma durante sete dias para preservar a umidade, como pode ser visto na Figura 18. Durante as primeiras 24h a cura ocorre a uma temperatura de 25° e o restante do tempo a uma temperatura de 50°. Após esse período eles foram desmoldados e passam pelo ensaio de resistência à compressão.

Figura 18: Materiais necessários para ensaio de pozolanicidade com cal

Fonte: acervo da autora, 2010

No ensaio feito com a cinza volante os corpos-de-prova obtiveram uma média de apenas 0,8 MPa. Ficando claro que não aconteceu reação suficiente para que possamos afirmar a pozolanicidade com cal.

4.3. ESTUDO DAS COMPOSIÇÕES PRELIMINARES

4.3.1 Resistência à compressão

Na etapa de estudo preliminar, a cinza foi utilizada como parte do aglomerante. Sendo assim, as argamassas foram produzidas em traço 1:3, sendo uma parte de aglomerante (composta por cimento e cinza) para três partes de agregado, mantendo a relação água/aglomerante. Assim foram moldadas três argamassas, onde a parte aglomerante foi composta de: 25% de cinza e 75% de cimento; 50% de cinza e 50% de cimento; e 75% de cinza e 25% de cimento, conforme Tabela 8. O ensaio obedeceu à norma de ensaio de cimento – resistência à compressão, conforme NBR 7215/1996, e os resultados estão expressos em MPa na Tabela 18.

ARGAMASSA 1:3	CORPO DE PROVA	Carga (TF) 28 dias	MPa
Padrão	P1	7,36	37,5
	P2	7,6	38,7
	P3	7,98	40,7
	P4	7	35,7
Média			38,1
25% Cinza	A1	4,18	21,3
	A2	5,06	25,8
	A3	5,04	25,7
	A4	4,92	25,1
Média			24,5
50% Cinza	B1	3,44	17,5
	B2	2,86	14,6
	B3	2,94	15,0
	B4	2,9	14,8
Média			15,5
75% Cinza	C1	1,52	7,7
	C2	1,36	6,9
	C3	1,52	7,7
	C4	1,48	7,5
Média			7,5

Tabela 16: Resultados – resistência à compressão – cinza como aglomerante

Fonte: acervo da autora, 2010

4.3.2 Análise da eficiência de estabilização

Para essa etapa da pesquisa foram feitas as análises nos extratos lixiviado e solubilizado e ainda a difratometria de raios-x das matrizes compostas com cimento e cinza, onde a cinza substituiu parte do aglomerante nas argamassas. O objetivo foi identificar se os elementos nocivos presentes na cinza *in natura* foram

estabilizados/solidificados nas matrizes cimentícias. Esses ensaios foram executados com corpos-de-prova com idade de 51 dias, sendo que nos primeiros 28 dias a cura aconteceu em imersão de água e durante os 23 dias restantes a cura aconteceu em ambiente de laboratório com temperatura média de 25°C. Os corpos-de-prova foram triturados e processados em moinho de bolas até obtenção de material passante pela peneira 9,5mm.

Na análise do extrato lixiviado não foram identificados elementos que ultrapassaram o limite máximo exigido por norma, conforme Tabela 17, tal como aconteceu na análise do extrato lixiviado na cinza *in natura*.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO LIXIVIADO mg/L	RESULTADO MATRIZ COM 25% CINZA	RESULTADO MATRIZ COM 50% CINZA	RESULTADO MATRIZ COM 75% CINZA
ARSÊNIO	1,0	LD	LD	LD
BÁRIO	70,0	4,3	4,65	1,76
CÁDMIO	0,5	0,056	0,059	0,027
CHUMBO	1,0	0,41	0,44	0,29
CROMO TOTAL	5,0	LD	LD	LD
FLUORETOS	150,0	0,84	0,76	0,47
MERCÚRIO	0,1	LD	LD	LD
PRATA	5,0	0,015	0,014	0,007
SELÊNIO	1,0	LD	LD	LD

LD: Limite de detecção

Tabela 17: Resultado – Lixiviação nas matrizes com 25%, 50% e 75% de cinza

Fonte: Laboratório de Saneamento-EESC, 2010. Adaptado pela autora

Como pode ser visto, todos os elementos estão muito abaixo do limite máximo exigido para o extrato lixiviado, sendo que alguns nem mesmo puderam ser identificados, ficando no limite de detecção.

No caso da análise dos extratos solubilizados ainda foi possível identificar alguns elementos que ultrapassaram os limites máximos, ou seja, elementos que não foram encapsulados na matriz de cimento. Esses elementos estão em destaque na Tabela 18.

Os elementos alumínio, fenóis totais e sulfatos apresentaram resultados acima do limite máximo da norma, com isso, pode-se classificar essas matrizes de cimento com cinza volante como: Classe II-A (não-perigoso e não-inerte).

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO MATRIZ COM 25% CINZA	RESULTADO MATRIZ COM 50% CINZA	RESULTADO MATRIZ COM 75% CINZA
ALUMÍNIO	0,2	5,02	9,82	0,99
ARSÊNIO	0,01	LD	LD	LD
BÁRIO	0,7	0,49	0,11	0,15
CÁDMIO	0,005	LD	LD	LD
CHUMBO	0,01	LD	LD	LD
CIANETOS	0,07	LD	LD	LD
CLORETOS	250	65	56,5	12,7
COBRE	2	0,006	LD	LD
CROMO TOTAL	0,05	LD	0,011	0,022
FENÓIS TOTAIS	0,01	0,03	0,032	LD
FERRO TOTAL	0,3	LD	LD	LD
FLUORETOS	1,5	0,13	0,01	0,23
MANGANÊS	0,1	LD	LD	LD
MERCÚRIO	0,001	LD	LD	LD
NITRATOS	10	2,19	1,68	0,54
PRATA	0,05	0,002	LD	LD
SELÊNIO	0,01	LD	LD	LD
SÓDIO	200	73	46,7	24,4
SULFATOS	250	LD	92	480
SURFACTANTES	0,5	LD	LD	LD
ZINCO	5	LD	LD	LD

LD: Limite de detecção

Tabela 18: Resultado – Solubilização nas matrizes com 25%, 50% e 75% de cinza

Fonte: Laboratório de Saneamento-EESC-USP, 2010. Adaptado pela autora

Comparando os resultados da solubilização das matrizes com a solubilização da cinza *in natura*, conforme Tabela 19, é possível constatar o potencial de estabilização/solidificação que tais matrizes cimentícias apresentam. No caso dos elementos cádmio e chumbo a eficiência chega a 100%, já que tais elementos ficaram no limite de detecção. Ainda não foi possível estabilizar todos os parâmetros, mas as matrizes apresentaram grande capacidade em manter os elementos nocivos presos na matriz endurecida.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO CINZA IN NATURA	RESULTADO MATRIZ COM 25% CINZA	RESULTADO MATRIZ COM 50% CINZA	RESULTADO MATRIZ COM 75% CINZA
ALUMÍNIO	0,2	18,66	5,02	9,82	0,99
BÁRIO	0,7	12,49	0,49	0,11	0,15
CÁDMIO	0,005	0,174	LD	LD	LD
CHUMBO	0,01	1,44	LD	LD	LD
FENÓIS TOTAIS	0,01	0,042	0,03	0,032	LD
SÓDIO	200	388,4	73	46,7	24,4
SULFATOS	250	3400	LD	92	480

LD: limite de detecção

Tabela 19: Comparação dos resultados: solubilização da cinza in natura e solubilização das matrizes produzidas com percentuais de cinza como parte do aglomerante.

Fonte: acervo da autora, 2010.

Com os dados comparativos foi possível calcular a eficiência de estabilização das matrizes, conforme fórmula 1 (disponível no item 3.3.12). Os resultados estão expressos na Tabela 20.

ELEMENTO	EFICIÊNCIA DE ESTABILIZAÇÃO (%)		
	MATRIZ 25%	MATRIZ 50%	MATRIZ 75%
ALUMÍNIO	73	47	95
BÁRIO	96	99	99
CÁDMIO	100	100	100
CHUMBO	100	100	100
FENÓIS TOTAIS	29	24	100
SÓDIO	81	88	94
SULFATOS	100	97	86

Tabela 20: Eficiência de estabilização das matrizes que utilizam cinza volante como parte do aglomerante.
Fonte: acervo da autora, 2011.

O resultado da solubilização das matrizes apresentou ainda, algumas alterações quanto à presença de alguns parâmetros. Identificamos que a solubilização das matrizes de cimento Portland, produzidas com resíduo, apresentavam algumas quantidades não condizentes com a solubilização do resíduo puro. Por esse motivo decidiu-se estudar apenas os materiais convencionais, as chamadas matrizes brancas, produzidas com cimento e areia. Obtivemos o resultado apresentado na Tabela 21.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO MATRIZ CIMENTO A
ALUMÍNIO	0,2	1,92
ARSÊNIO	0,01	LD
BÁRIO	0,7	1,43
CÁDMIO	0,005	LD
CHUMBO	0,01	0,25
CIANETOS	0,07	LD
CLORETOS	250	45,5
COBRE	2	LD
CROMO TOTAL	0,05	LD
FENÓIS TOTAIS	0,01	LD
FERRO TOTAL	0,3	0,253
FLUORETOS	1,5	0,31
MANGANÊS	0,1	LD
MERCÚRIO	0,001	LD
NITRATOS	10	1,45
PRATA	0,05	0,003
SELÊNIO	0,01	LD
SÓDIO	200	100,4
SULFATOS	250	LD
SURFACTANTES	0,5	LD
ZINCO	5	0,014

LD: Limite de detecção

Tabela 21: Resultado – solubilização matriz branca.

Fonte: Laboratório de Saneamento-EESC-USP, 2010. Adaptado pela autora.

Esse resultado comprova que os materiais convencionais estão contribuindo para o aumento de elementos nocivos na matriz. Os elementos alumínio, bário e chumbo ultrapassam o limite máximo no solubilizado, ainda que a matriz seja produzida sem o resíduo. Diante do resultado ficou decidido mudar a marca de cimento como estratégia para tentar minimizar o acúmulo de elementos nocivos na matriz.

4.3.3 Difração de raios-x

Na difratometria de raios-x o objetivo foi identificar os compostos presentes nas matrizes, para visualizar como os elementos presentes na cinza *in natura* reagiram com o cimento na presença da água. A combinação de elementos, formando outros compostos, pode mostrar se reações químicas aconteceram entre o resíduo e o cimento, caracterizando assim uma encapsulação química.

No difratograma da matriz de cimento Portland com 25% de cinza volante foram identificados quatro compostos, conforme Figura 19.

Figura 19: Difratograma de raios-x da matriz de cimento Portland com 25% de cinza volante
Fonte: IFSC-FFI, 2010

Dos compostos apresentados na Figura 19, três são basicamente sílica (SiO_2), ou dióxido de silício. O quartzo e a moganita são formas cristalinas da sílica natural (ZIRTEC²⁶, 2010). A lutecite é também uma forma de quartzo microcristalino, onde os grãos são empilhados em paralelo, é também chamado de moganita por alguns autores.²⁷ O outro composto é chamado de hillebrandite, $\text{Ca}_2(\text{SiO}_3)(\text{OH})_2$, representa a reação química entre o silicato e o cálcio.

No difratograma da matriz de cimento Portland com 50% de cinza volante foram encontrados cinco compostos, conforme Figura 20.

Figura 20: Difratograma de raios-x da matriz de cimento Portland com 50% de cinza volante
Fonte: IFSC-FFI, 2010

Desses cinco compostos, dois são sílicas cristalinas, quartzo (SiO_2). Um dos compostos apresenta o silício combinado ao enxofre, formando um sulfeto de silício (SiS_2). A berlinita (AlPO_4), outro composto encontrado, segundo Tavares (2008.p 10) é um composto com características similares à sílica em termos de densidade e é um material que apresenta particular amorfização quando submetido a grandes pressões. E o

²⁶ Informação disponível em: <http://www.zirtec.com.br/areia/silica.htm>. Acesso em 3 de junho de 2010.

²⁷ Informações disponíveis em: http://www.quartzpage.de/print/gen_types.html. Acesso em 5 de novembro de 2010.

composto chamado afwillite, $\text{Ca}_3 (\text{SiO}_3\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, mostra a reação entre o silicato, o cálcio e a água.

No difratograma da matriz de cimento Portland com 75% de cinza foram identificados seis compostos, como pode ser visto na Figura 21. Dentre esses, três são variações da sílica (SiO_2), todas com características cristalinas, o quartzo, a moganita e a lutecita. Outro composto presente é a calcita, ou o carbonato de cálcio, muito comum na produção de cimentos e cal para argamassa, segundo dados da UNESP²⁸. E ainda estão presentes dois compostos de silicato de cal hidratado, onde pode-se observar a reação entre o cálcio e a sílica na presença de água.

Figura 21: Difratograma de raios-x da matriz de cimento Portland com 75% de cinza volante
Fonte: IFSC-FFI, 2010

4.4. ADEQUAÇÃO DAS MATRIZES

Diante dos resultados da fase preliminar ficou claro que utilizar a cinza volante como aglomerante não dá resultados expressivos, dessa forma o passo seguinte da pesquisa foi analisar matrizes utilizando a cinza como agregado. Para essa etapa foram

²⁸ Informações disponíveis em: <http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/carbonatos/calcita.html>. Acesso em 5 de novembro de 2010.

propostos três traços iniciais: 1:1, 1:3 e 1:5. Onde seriam substituídos 100% da areia por cinza. Para efeito de comparação foram moldadas as matrizes brancas, ou seja, matrizes padrão sem adição da cinza. Nas matrizes padrão foi utilizada a areia comum de granulometria bem próxima à da cinza. Essas matrizes seriam analisadas do ponto de vista mecânico, ensaio de resistência à compressão.

Primeiro foram moldados os corpos-de-prova da argamassa 1:1 padrão, somente cimento e areia, em seguida iniciou-se a produção da argamassa composta com cinza e cimento, mas seu processo de produção apresentou dificuldades: somente cimento e cinza na mistura demanda muito água, para 1800g de material seco foram adicionados 650g de água, e ainda assim no teste do tato, quando a argamassa é comprimida com as mãos, não foi possível identificar o ponto de liga. Para entender melhor o comportamento da argamassa nos moldes, foi moldado um corpo-de-prova teste que foi imediatamente desmoldado, como sua coesão foi satisfatória decidimos então moldar os quatro corpos-de-prova. Devido à dificuldade de moldar os corpos-de-prova desse primeiro traço, ficou decidido descartar esse ensaio, pois a argamassa apresentou uma característica não satisfatória, falta de coesão. Essa falta de coesão deve-se à falta de grãos maiores onde a pasta de cimento possa envolver-se, como a cinza volante é um pó, tem granulometria bem fina a pasta não tem onde agarrar, pois a área superficial do grão é muito pequena. A estratégia foi acrescentar percentuais de areia, que tenha uma granulometria média, aumentando a área superficial, fazendo assim com que a argamassa apresente mais coesão.

Diante dos resultados apresentados, foram propostos novos traços, agora utilizando a cinza como *filler* (material de preenchimento) em conjunto com o agregado, a areia. Reduzimos os traços, adotando somente 1:1 e 1:3 adicionando percentuais de areia no traço. Os percentuais escolhidos foram apenas dois para viabilizar os ensaios preliminares, dessa forma foram planejadas argamassas com traço 1:1 (uma parte de cimento para uma parte de agregado) sendo o agregado 70% cinza e 30% areia; e 1:1 sendo o agregado 50% cinza e 50% areia; e argamassas com traço 1:3 (uma parte de cimento para três partes de agregado) sendo o agregado 70% cinza e 30% areia, e 1:3 sendo o agregado 50% cinza e 50% areia. De todas essas argamassas compostas para o ensaio, uma apresentou uma característica muito particular. A argamassa 1:3 com 70% de

cinza como agregado, após 24h de cura, não apresentou condições para desmoldagem. A princípio imaginou-se ser algum problema com as fôrmas, talvez por falta de lubrificação não fosse possível desmoldar os corpos-de-prova.

Sendo assim, foi feita uma segunda tentativa cuidando com todos os passos da moldagem. Porém, novamente nessa segunda tentativa os corpos-de-prova não puderam ser desmoldados. Observou-se um agarramento das paredes das formas, como pode ser visto na Figura 22, por conta da grande expansão da argamassa, fazendo com que a lubrificação fosse jogada para fora das fôrmas. Segundo Xie e Guo (2010.p 331) materiais compósitos com adição de cinza volante tendem a ser expansivos, quanto maior é o percentual na mistura maior vai ser a expansão.

Figura 22: Corpo-de-prova traço 1:3 (70% cinza) não apresenta condições para desmoldar

Fonte: acervo da autora, 2010

A hipótese é que a grande quantidade de sulfatos presentes na cinza, que nesse traço está em elevado percentual, possa ter ocasionado essa expansão. Segundo Sichieri (et al, 2008.p 115) na presença de água os sulfatos são transformados em ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ainda na presença de hidróxido de cálcio, que é oriunda da cal livre do processo de fabricação do cimento, são transformados em sulfato de cálcio hidratado, esse pode reagir com o C_3A e formar o sulfoaluminato de cálcio, as consequências dessa reação química são justamente dilatação volumétrica, desagregação e fissuração, podendo causar ainda a perda de resistência mecânica decorrente da falta de coesão.

Diante do resultado, ficou decidido desconsiderar o traço 1:3 com 70% de cinza e continuar a fase preliminar de ensaios testando também a matriz com traço 1:2, sendo o agregado dividido entre areia e cinza (*filler*). Trabalhar esse traço intermediário é mais uma etapa da fase de adequação das matrizes, buscando definir a matriz com a qual

faremos a continuidade dos testes e averiguações. A Tabela 22 apresenta os materiais e suas quantidades para moldar os corpos-de-prova desses três traços escolhidos (1:1, 1:2 e 1:3), sendo que cada traço foi experimentado com duas variações na composição: o agregado foi composto com uma parte de areia e uma parte de cinza, em percentuais diferentes.

TRAÇO 1:1	Massa necessária (g)		
	Argamassa PA (padrão)	Argamassa A-70 (Agregado: 70% cinza 30% areia)	Argamassa A-50 (Agregado: 50% cinza 50% areia)
Cimento CPPIII-40 RS	900	600	600
Cinza Volante	-	420	300
Areia	900	180	300
Água	259*	375,3*	306,9*
TRAÇO 1:2	Massa necessária (g)		
	Argamassa PB (padrão)	Argamassa B-70 (Agregado: 70% cinza 30% areia)	Argamassa B-50 (Agregado: 50% cinza 50% areia)
Cimento CPPIII-40 RS	600	400	400
Cinza Volante	-	560	400
Areia	1200	240	400
Água	184*	400*	321*
TRAÇO 1:3	Massa necessária (g)		
	Argamassa PC (padrão)	Argamassa C-70 (Agregado: 70% cinza 30% areia)	Argamassa C-50 (Agregado: 50% cinza 50% areia)
Cimento CPPIII-40 RS	417	300	300
Cinza Volante	-	630	450
Areia	1251	270	450
Água	200*	380,2*	325,8*

*quantidade necessária para ponto de prensagem

Tabela 22: Planilha de quantidades – argamassas utilizando cinza como agregado

Fonte: acervo da autora, 2010.

4.4.1 Resistência à compressão das matrizes

Na Tabela 23 estão dispostos os resultados do ensaio de resistência à compressão dos três traços: 1:1; 1:2 e 1:3, cada traço com dois percentuais diferentes de

cinza e areia, com exceção do traço 1:3 com 70% de cinza, já que esse apresentou grande expansão, prejudicando a argamassa e por esse motivo descartado.

ARGAMASSA	CORPO DE PROVA	Carga (TF) 28 dias	Mpa
PADRÃO 1/1	P1	9,96	50,7
	P2	12,2	62,1
	P3	7,16	36,5
	P4	9,16	46,7
Média			49,0
1/1 50% CINZA como agregado	A1	8,26	42,1
	A2	7,64	38,9
	A3	7,46	38,0
	A4	9,08	46,3
Média			41,3
1/1 70% CINZA como agregado	A1	6,14	31,3
	A2	5,44	27,7
	A3	5,52	28,1
	A4	5,66	28,8
Média			29,0
1/2 PADRÃO	P1	10,54	53,7
	P2	8,52	43,4
	P3	8,96	45,6
	P4	11,56	58,9
Média			47,6
1/2 50% CINZA como agregado	B1	3,92	20,0
	B2	3,18	16,2
	B3	3,88	19,8
	B4	4,12	21,0
Média			19,2
1/2 70% CINZA como agregado	B1	3,14	16,0
	B2	3,18	16,2
	B3	3,34	17,0
	B4	3,18	16,2
Média			16,4
PADRÃO 1/3	P1	3,44	17,5
	P2	2,86	14,6
	P3	2,94	15,0
	P4	2,9	14,8
Média			15,5
1/3 50% CINZA como agregado	C1	2,52	12,8
	C2	2,44	12,4
	C3	2,78	14,2
	C4	2,42	12,3
Média			12,9

Tabela 23: Resultados-resistência à compressão-cinza como agregado
Fonte: acervo da autora, 2010

Com o resultado do ensaio de resistência à compressão foi possível eleger uma das composições. O traço 1:3, uma parte de cimento para três de agregado (sendo o agregado 50% cinza volante e 50% areia) foi eleito para a continuidade das análises, pois apresentou bom desempenho mecânico, com 12,9 MPa de média, e ainda por ser uma composição que utiliza grande quantidade de cinza. Em percentual, essa matriz é composta por: 25% de cimento, 37,5% de areia e 37,5% de cinza volante. Segundo Babu e Rao (1994.p 224), os primeiros esforços para utilização da cinza volante, limitava-se a um máximo de 35% em concretos, provavelmente esse valor foi estipulado devido a quantidade de água necessária na composição, aumentando assim a relação água/cimento, o que poderia diminuir a resistência à compressão. Porém, ao longo de muitas investigações laboratoriais, passou-se a indicar que o ideal seria um percentual de 55-60%, mas sempre com adição de superplastificantes.

Com essa matriz escolhida foram feitos os ensaios complementares para obtenção de suas características. A matriz apresenta resultado satisfatório do ponto de vista mecânico, mas ainda é necessário saber qual o seu comportamento quanto a eficiência de estabilizar/solidificar os elementos nocivos. Assim como, entender suas características físicas de porosidade e de tempo de pega. Os resultados a seguir apresentam tais características complementares.

4.4.2 Eficiência de estabilização da matriz adequada

Com o objetivo de identificar a eficiência de estabilização da matriz escolhida foi executado o ensaio de análise do extrato solubilizado na matriz 1:3 com 50% cinza. O resultado do ensaio está disposto na Tabela 24, onde estão em destaque os elementos que não foram estabilizados/solidificados na matriz de cimento, pois esses ainda ficaram acima do limite máximo para o extrato solubilizado. Os elementos alumínio, bário e chumbo.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO MATRIZ 1:3 (50% cinza como agregado)
ALUMÍNIO	0,2	11,52
ARSÊNIO	0,01	LD
BÁRIO	0,7	0,15
CÁDMIO	0,005	LD
CHUMBO	0,01	0,16
CIANETOS	0,07	LD
CLORETOS	250	52,5
COBRE	2	LD
CROMO TOTAL	0,05	LD
FENÓIS TOTAIS	0,01	LD
FERRO TOTAL	0,3	0,272
FLUORETOS	1,5	0,67
MANGANÊS	0,1	LD
MERCÚRIO	0,001	LD
NITRATOS	10	1,61
PRATA	0,05	0,001
SELÊNIO	0,01	LD
SÓDIO	200	150,5
SULFATOS	250	100
SURFACTANTES	0,5	LD
ZINCO	5	LD

LD: Limite de detecção

Tabela 24: Resultado – Solubilização na matriz 1:3 – 50% cinza como agregado

Fonte: acervo da autora, 2010

Comparando o resultado da cinza volante *in natura* com o resultado da solubilização da matriz 1:3 (sendo 50% do agregado composto de cinza e 50% de areia), conforme Tabela 25, já é possível identificar o potencial de estabilização da matriz, pois dos sete elementos presentes na cinza *in natura*, quatro foram estabilizados/solidificados ficando dentro dos parâmetros na norma, sendo que desses quatro, dois ficaram dentro do limite de detecção.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO CINZA <i>IN NATURA</i>	RESULTADO MATRIZ 1:3 - 50%
ALUMÍNIO	0,2	18,66	11,52
BÁRIO	0,7	12,49	0,15
CÁDMIO	0,005	0,174	LD
CHUMBO	0,01	1,44	0,16
FENÓIS TOTAIS	0,01	0,042	LD
SÓDIO	200	388,4	150,5
SULFATOS	250	3400	100

LD: Limite de detecção

Tabela 25: Comparação dos resultados: Solubilização da cinza *in natura* e solubilização da matriz 1:3-50% cinza como agregado

Fonte: acervo da autora, 2011.

E com os dados comparativos, foi possível calcular a eficiência de estabilização da matriz 1:3, conforme pode ser visto na Tabela 26.

ELEMENTO	MATRIZ 1:3 (cinza como parte do agregado)
	EFICIÊNCIA DE ESTABILIZAÇÃO (%)
ALUMÍNIO	38
BÁRIO	99
CÁDMIO	100
CHUMBO	89
FENÓIS TOTAIS	100
SÓDIO	61
SULFATOS	97

Tabela 26: Eficiência de estabilização da matriz 1:3 (sendo o agregado 50% cinza e 50% areia)

Fonte: acervo da autora, 2011.

Como na etapa anterior ficou decidido mudar a marca de cimento, na tentativa de minimizar a presença de elementos nocivos, novamente os materiais convencionais passaram por avaliação química. A matriz branca, agora composta com outra marca de cimento, intitulado de cimento B, passou pelo ensaio de solubilização, cujo resultado está disposto na Tabela 27. Onde é possível observar que ainda há presença de elementos que ultrapassam os limites colocados por norma.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO MATRIZ CIMENTO B
ALUMÍNIO	0,2	0,52
ARSÊNIO	0,01	LD
BÁRIO	0,7	0,45
CÁDMIO	0,005	0,02
CHUMBO	0,01	0,1
CIANETOS	0,07	LD
CLORETOS	250	32
COBRE	2	LD
CROMO TOTAL	0,05	LD
FENÓIS TOTAIS	0,01	LD
FERRO TOTAL	0,3	0,551
FLUORETOS	1,5	0,11
MANGANÊS	0,1	LD
MERCÚRIO	0,001	LD
NITRATOS	10	2,05
PRATA	0,05	0,003
SELÊNIO	0,01	LD
SÓDIO	200	65,7
SULFATOS	250	62
SURFACTANTES	0,5	LD
ZINCO	5	0,168

LD: Limite de detecção

Tabela 27: Resultado – Solubilização – Matriz branca com cimento B

Fonte: Laboratório de Saneamento-EESC-USP, 2011. Adaptado pela autora.

Comparando os resultados das duas matrizes brancas, conforme Tabela 28, é notável que os três elementos identificados na matriz com cimento A apresentam valores bem menores na matriz com cimento B, inclusive deixando o bário dentre do limite da norma. Porém, surgiram novos elementos: o cádmio e o ferro total, demonstrando que os materiais da segunda matriz testada também não são inertes.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO MATRIZ CIMENTO A	RESULTADO MATRIZ CIMENTO B
ALUMÍNIO	0,2	1,92	0,52
BÁRIO	0,7	1,43	0,45
CÁDMIO	0,005	LD	0,02
CHUMBO	0,01	0,25	0,1
FERRO TOTAL	0,3	0,253	0,551

LD: Limite de detecção

Tabela 28: Comparação entre as solubilizações das matrizes brancas
 Fonte: acervo da autora, 2011.

Diante do exposto, Nogueira e Sichieri (2011b) sugerem que todos os cimentos do tipo CP III, disponíveis no mercado, sejam investigados pelos órgãos competentes de controle de qualidade de materiais de construção civil. Pois os resultados aqui apresentados indicam a possível contaminação de duas marcas, e isso pode estar acontecendo em tantas outras.

4.4.3 Tempo de pega da matriz adequada

O ensaio foi feito no aparelho de Vicat (Figura 23), e para facilitar a interpretação dos resultados, a primeira pasta analisada foi a pasta de cimento CP III, somente depois foi analisada a pasta com adição de cinza, para que a comparação dos resultados fosse possível. A pasta de cimento foi produzida com 500g de cimento CP III e 152g de água para estabelecer uma consistência normal. Essa pasta apresentou início de pega com 5h e 15 min., e fim de pega com 6h e 30 min. A pasta de cimento com adição de cinza volante foi produzida com 200g de cimento e 300g de cinza volante, sendo acrescentados 285g de água para chegar à consistência normal. Essa segunda pasta apresentou início de pega após 9h e 15 min., e fim de pega após 13h e 10 min.

Figura 23: Aparelho de Vicat, ensaio de início e fim de pega.

Fonte: acervo da autora, 2011.

Os resultados deixam claro que a adição de cinza na pasta de cimento causa grande retardamento tanto no início de pega quanto no fim de pega. O início de pega na pasta de cimento com adição de cinza aconteceu com 4 horas a mais, e o fim de pega aconteceu com mais de 4 horas a mais.

4.4.4 Permeabilidade ao ar da matriz adequada

Para realização do ensaio foram moldados corpos-de-prova de 50 X 100 mm, sendo duas amostras: R2, amostra de referência produzida somente com cimento e areia; e BCV 1, amostra do bloco de cinza volante, produzida com cimento, areia e cinza na mesma proporção do traço 1:3, sendo o agregado 50% cinza e 50% areia. Essas amostras foram mantidas em câmara úmida até a idade de 28 dias. Após esse período de cura eles foram preparados para o permeâmetro. Primeiro foram secos em estufa durante 24h, depois foram cortados com espessura de 25 mm, descartando as extremidades. O ensaio foi realizado em corpos-de-prova de 50mm de diâmetro e 25mm de altura, conforme Figura 24.

Figura 24: Corpos-de-prova para ensaio de permeabilidade ao ar.
Fonte: acervo da autora, 2011.

Esses corpos-de-prova tiveram a envoltória selada com silicone e foram colocados em recipiente com sílica gel, conforme Figura 25, para retirar toda a umidade. Só após essa preparação a máquina é capaz de receber os corpos-de-prova para um funcionamento adequado.

Figura 25: Preparação corpos-de-prova para permeabilidade ao ar.
Fonte: acervo da autora, 2011.

Após essa preparação as amostras foram levadas ao permeômetro, onde as leituras de pressão, volume e tempo foram efetuadas. Os resultados estão colocados na Tabela 29.

AMOSTRA R2				AMOSTRA BCV 1			
Ponto	ΔP (bar)	V (ml)	t (s)	Ponto	ΔP (bar)	V (ml)	t (s)
1	2,06	6	7,35	1	0,75	6	5,59
	2,06	6	7,28		0,74	6	5,47
2	2,14	6	7,06	2	0,96	6	4,12
	2,14	6	7,04		0,95	6	4,04
3	2,35	6	6,09	3	1,19	6	3,25
	2,35	6	6,19		1,19	6	3,26
4	2,43	6	5,97	4	1,37	6	2,6
	2,43	6	5,85		1,37	6	2,56
5	2,61	6	5,44	5	1,57	6	2,32
	2,61	6	5,63		1,58	6	2,44
6	2,73	6	5,09	6	1,73	6	1,97
	2,73	6	5,16		1,73	6	1,97
7	2,86	6	4,68	7	1,81	6	1,81
	2,86	6	4,56		1,81	6	1,84
8	3,08	6	4,25	8	1,97	11	2,88
	3,08	6	4,31		1,96	11	2,91
9	3,19	6	4,19	9	2,15	11	2,57
	3,19	6	4,19		2,14	11	2,66
10	3,29	6	3,75	10	2,33	11	2,4
	3,29	6	3,91		2,33	11	2,31
11	3,39	6	3,97	11	2,57	11	2,19
	3,38	6	3,82		2,56	11	2,18
12	3,55	6	3,5	12	2,77	11	1,84
	3,54	6	3,56		2,76	11	1,8

Tabela 29: Dados coletados no permeômetro.

Fonte: acervo da autora, 2011.

Após análise dos dados coletados foram gerados dois gráficos, um a partir da equação Darciana e outro a partir da equação não-Darciana, cujos resultados estão colocados na Tabela 30. Nesses gráficos comparativos é possível observar a permeabilidade de cada amostra e a diferença entre elas.

Amostra	k_1 (m ²)	k_2 (m)
R2	1,53E-15	8,05E-13
BCV 1	7,03E-15	2,35E-11

Tabela 30: Resultados – Permeabilidade ao ar.

Fonte: acervo da autora, 2011.

No Gráfico 2 da equação Darciana, onde o resultado é dado em m², é possível identificar que a amostra BCV1 é bem mais porosa que a amostra de referência R2.

Gráfico 2: Permeabilidade Darciana – BCV1: Bloco de cinza volante e R2: referência.
Fonte: acervo da autora, 2011

Já no Gráfico 3, também é observado que a amostra do BVC 1 é mais porosa que a amostra de referência, porém em proporções maiores. Comparando os dois gráficos é notável que a amostra que representa o bloco de cinza volante é bem mais porosa em ambas as avaliações. A possível explicação para esse comportamento é a quantidade de água presente na argamassa. Segundo Innocentini (et al, 2011.p 36), o aumento do teor de água causa a elevação de ambas as constantes de permeabilidade, K_1 e k_2 . Na matriz do bloco a relação água/cimento é considerada alta: 0,86. E segundo Pereira (et al, 2008.p 164), o aumento da relação água/cimento aumenta a porosidade do material, aumentando também a quantidade de poros capilares responsáveis pelo fluxo de fluidos através da amostra.

Gráfico 3: Permeabilidade não-Darciana – BCV1: Bloco de cinza volante e R2: referência.
Fonte: acervo da autora, 2011

4.5. PRODUÇÃO DOS BLOCOS

O processo de produção dos blocos começa com a definição da quantidade de material que será usado para atender à demanda de blocos prensados. A Tabela 31 apresenta as quantidades necessárias para produzir os 8 blocos teste e ainda os 40 blocos que serão utilizados nos ensaios finais.

quantidade de blocos (unid)		Material			
		cimento	areia	cinza	água
Blocos de cinza	1	800	1200	1200	695
	8	6,4	9,6	9,6	5,56
	40	32	48	48	27,8
TOTAL DE MATERIAL		38,4	57,6	57,6	33,36
TOTAL-MASSA SECA		153,6			

Tabela 31: Quantitativo de material – moldagem dos blocos
Fonte: acervo da autora, 2011

A fase de teste é necessária para identificar qual é a quantidade de água necessária para prensagem dos blocos. Somente depois de identificar qual a umidade correta de prensagem, é então recomendado passar para a etapa de moldagem dos blocos. Para essa fase de obtenção da água necessária para ponto de prensagem, é necessário adicionar água aos poucos enquanto a argamassa ainda está na betoneira, o

teste feito para verificar a umidade é manual, identificando quando a argamassa atinge a consistência seca, ou seja, não solta água quando pressionado na palma da mão, mas tem umidade suficiente para ser moldado.

Para produzir as argamassas, os materiais foram separados e levados para junto da área de produção, que pode ser vista na Figura 26. Essa área de produção fica localizada na área externa do Laboratório de Construção Civil, devidamente coberta. Nesse local permanecem: a betoneira, utilizada para misturar a massa; a prensa, utilizada para moldar os blocos e ainda as mesas para armazenamento dos blocos prontos.

Figura 26: Área de produção dos blocos

Fonte: acervo da autora, 2011.

Após esse procedimento de identificação da quantidade de água ideal para a moldagem na prensa, identificou-se que são necessários cerca de 695g de água para cada bloco. A relação água/aglomerante fica em torno de 0,85, deixando claro que a argamassa produzida com cinza volante precisa de muita água para ser moldada de maneira satisfatória. “A demanda de água da mistura está relacionada com a área superficial e com densidade de empacotamento das partículas: quanto maior a área superficial e menor a densidade de empacotamento, maior a demanda de água.” (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009.p 27).

Com essa quantidade de água definida, foram moldados os 40 blocos para a fase de investigação experimental dos elementos construtivos. Desses 40, tiveram que ser descartados 10, pois a moldagem não foi satisfatória. Os blocos descartados apresentavam rachaduras, superfície rugosa e aspecto quebradiço, algumas dessas características podem ser vista na Figura 27.

Figura 27: Bloco descartado
Fonte: acervo da autora, 2011

Os blocos que apresentaram melhor moldagem (Figura 28) foram separados, nos primeiros dois dias de cura eles foram deixados na área de moldagem e passaram por umectação duas vezes por dia, isso aconteceu para que o transporte acontecesse após a cura inicial com maior resistência. Logo após esse período, os blocos foram levados para a câmara úmida, onde ficaram até a data estabelecida para cada ensaio.

Figura 28: Blocos moldados – Bloco C.V.
Fonte: acervo da autora, 2011

Os blocos produzidos têm volume de $2083,4 \text{ cm}^3$ (já descartando o volume dos orifícios) e a massa média do bloco é $3535,0 \text{ g}$. A densidade do bloco fica em torno de $1,70 \text{ g/cm}^3$.

4.6. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS BLOCOS

4.6.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com os procedimentos de ensaio da NBR 8492/1984 – Tijolo maciço de solo-cimento. Para aferir a resistência à compressão são necessários 10 blocos para cada idade de ruptura. Esses blocos são preparados de acordo com a norma, transformando-se em corpos-de-prova (Figura 29) que devem permanecer o tempo de cura em câmara úmida. Para essa avaliação, o parâmetro é estabelecido pela NBR 8491/1984 - Especificações, que determina que a média dos resultados deve ser maior que 2,0 MPa, e os resultados individuais não podem ser menores que 1,7 MPa.

Figura 29: Preparação dos blocos para ensaio de resistência à compressão

Fonte: acervo da autora, 2011

No caso do bloco de cinza volante, com idade de ruptura de 28 dias, a média dos resultados ficou em 4,74 MPa, e o menor resultado individual foi de 3,82 MPa, como pode ser visto na Tabela 32. Atendendo e superando os parâmetros da norma.

Tijolo CV	Área da face mm ²	Carga de ruptura t/f	Resistência Mpa (28 dias)
1	15657,13	7,56	4,83
2	15871,93	8,4	5,29
3	15726,28	7,84	4,99
4	15728,89	7,46	4,74
5	15767,44	7,9	5,01
6	15904,44	6,08	3,82
7	15990,8	7,46	4,67
8	15832,64	7,6	4,80
9	15690,85	7,44	4,74
10	16222,78	7,38	4,55

Tabela 32: Resistência à compressão – Bloco CV – 28 dias de cura

Fonte: acervo da autora, 2011

No caso do bloco de cinza volante, com idade de ruptura de 90 dias, a média dos resultados ficou em 4,82 MPa, e o menor resultado individual foi de 4,11 MPa, como pode ser visto na Tabela 33. Também atendendo e superando os parâmetros da norma.

Tijolo	Área da face mm ²	Carga de ruptura t/f	Resistência Mpa (90 dias)
1	15519,27	6,38	4,11
2	15532,86	8,88	5,72
3	15855,63	8,2	5,17
4	15821,49	8,08	5,11
5	15637,66	6,6	4,22
6	15857,83	7,4	4,67
7	15829,59	7,22	4,56
8	16112,49	6,74	4,18
9	16072,07	7,8	4,85
10	15512,42	8,72	5,62

Tabela 33: Resistência à compressão – Bloco CV – 90 dias de cura

Fonte: acervo da autora, 2011.

O desempenho mecânico dos blocos, nas idades de 28 e 90 dias, é bem semelhante, como pode ser visto no Gráfico 4. O ganho de resistência à compressão é de apenas 1,68% de uma idade para a outra.

Gráfico 4: Resistência média dos blocos de cinza volante em diferentes idades de ruptura.

Fonte: acervo da autora, 2011.

4.6.2 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção foi baseado no procedimento da NBR 8492/1984, que determina aferição da absorção em três blocos, obtendo-se assim a média dos resultados. O parâmetro é estabelecido pela NBR 8491/1984, essa norma exige que a média dos resultados seja maior que 20%, e que os valores individuais sejam superiores a 22%.

A Tabela 34 apresenta os dados de absorção de água dos blocos com idade de 28 dias. Os resultados para essa idade não atendem a norma, já que a absorção média ficou em 23,1%, ultrapassando os 20% estabelecidos. O maior valor individual apresentou resultado de 24%, maior que os 22% estabelecidos. Sendo assim, esses dados demonstram que, para essa idade, os blocos não atendem a norma.

Bloco	M1	M2	Absorção %
	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	
1	2857,5	3543,5	24,0
2	2873,2	3538,1	23,1
3	2883,5	3523,5	22,2
Média	2871,4	3535,0	23,1

Tabela 34: Absorção de água – Bloco CV – 28 dias de cura

Fonte: acervo da autora, 2011

Por outro lado, quando observamos o resultado da absorção em conjunto com a média de resistência, é possível verificar que o bloco produzido apresenta bom desempenho, pois apesar de ser um pouco mais poroso do que o estabelecido pela norma e bem mais leve do que blocos comuns de solo cimento, sua resistência média é satisfatória. E como a norma adotada não é específica para blocos produzidos com resíduos, essa proximidade no resultado já pode ser vista como um ponto positivo. (NOGUEIRA, SICHIERI e PABLOS, 2011b)

Já o resultado para a idade de 90 dias, apresenta índices que atendem a norma, como pode ser visto na Tabela 35. Sendo a média dos resultados 19,5% e o maior valor individual 19,8%.

Bloco	M1	M2	Absorção %
	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	
1	3001,0	3579,4	19,3
2	3030,9	3618,0	19,4
3	2954,5	3540,5	19,8
Média	2995,5	3579,3	19,5

Tabela 35: Absorção de água – Bloco CV – 90 dias de cura

Fonte: acervo da autora, 2011.

4.6.3 Eficiência de estabilização

Para analisar a eficiência de estabilização dos blocos produzidos, foi executado o ensaio de solubilização nos blocos com idades de 28 e 90 dias. Todos os procedimentos estão descritos no item 3.3.2. Para produzir o extrato solubilizado os tijolos foram triturados e passados na peneira 9,5 mm.

O resultado da análise dos extratos solubilizados dos blocos com essas duas idades está disposto na Tabela 36, onde estão em destaque os elementos que ultrapassaram o limite máximo imposto por norma. Nessa tabela é possível observar que o bloco com idade de 90 dias apresentou a capacidade de estabilizar/solidificar mais elementos. O que pode ser um indicativo de que as reações de hidratação que ainda acontecem durante esse período, também auxiliam para acontecer as reações de estabilização por solidificação.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO BLOCO DE CINZA 28 dias	RESULTADO BLOCOS DE CINZA 90 dias
ALUMÍNIO	0,2	22,27	18,48
ARSÊNIO	0,01	LD	LD
BÁRIO	0,7	0,14	LD
CÁDMIO	0,005	0,006	LD
CHUMBO	0,01	LD	LD
CIANETOS	0,07	LD	LD
CLORETOS	250	18	21
COBRE	2	LD	LD
CROMO TOTAL	0,05	0,075	0,142
FENÓIS TOTAIS	0,01	0,028	LD
FERRO TOTAL	0,3	0,281	0,286
FLUORETOS	1,5	0,17	0,16
MANGANÊS	0,1	LD	0,009
MERCÚRIO	0,001	LD	LD
NITRATOS	10	1,13	1,02
PRATA	0,05	LD	LD
SELÊNIO	0,01	LD	LD
SÓDIO	200	229	194,2
SULFATOS	250	540	520
SURFACTANTES	0,5	LD	LD
ZINCO	5	0,054	0,009

LD: Limite de detecção

Tabela 36: Resultados – Solubilização – Bloco de cinza volante – 28 e 90 dias de cura

Fonte: Laboratório de Saneamento, adaptado pela autora, 2011.

Comparando o resultado da cinza volante *in natura* com o resultado dos blocos em diferentes idades, conforme Tabela 37, é possível começar a avaliar a eficiência de estabilização dos blocos. O bloco com idade de 28 dias foi capaz de estabilizar dois elementos: o bário e o cádmio, dos sete identificados na cinza *in natura*. Já o bloco com idade de 90 dias foi capaz de estabilizar cinco elementos, sendo que quatro desses ficaram no limite de detecção.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO CINZA <i>IN NATURA</i>	RESULTADO BLOCO DE CINZA 28 DIAS	RESULTADO BLOCO DE CINZA 90 DIAS
ALUMÍNIO	0,2	18,66	22,27	18,48
BÁRIO	0,7	12,49	0,14	LD
CÁDMIO	0,005	0,174	0,006	LD
CHUMBO	0,01	1,44	LD	LD
CROMO TOTAL	0,05	0,022	0,075	0,142
FENÓIS TOTAIS	0,01	0,042	0,028	LD
SÓDIO	200	388,4	229	194,2
SULFATOS	250	3400	540	520

LD: limite de detecção

Tabela 37: Comparação entre solubilizações da cinza volante *in natura* e blocos com diferentes idades.

Fonte: acervo da autora, 2011

Mas esses resultados também apresentam dados com difícil interpretação, como é o caso do aparecimento do elemento cromo total. Esse elemento está presente nos dois blocos, mas não identificado na cinza *in natura*. Outro dado de difícil interpretação é a resultado do parâmetro alumínio no bloco de 28 dias, o resultado do bloco é maior que o resultado na cinza *in natura*.

Com esses dados comparativos foi possível calcular a eficiência de estabilização dos blocos, conforme pode ser visto na Tabela 38.

ELEMENTO	EFICIÊNCIA DE ESTABILIZAÇÃO (%)	
	BLOCO DE CINZA 28 dias	BLOCO DE CINZA 90 dias
ALUMÍNIO	0	1
BÁRIO	99	100
CÁDMIO	97	100
CHUMBO	100	100
FENÓIS TOTAIS	33	100
SÓDIO	41	50
SULFATOS	84	85

Tabela 38: Eficiência de estabilização – Blocos de cinza.

Fonte: acervo da autora, 2011

A eficiência de estabilização dos blocos, em ambas as idades, apresentou resultados positivos principalmente para os elementos bário, cádmio e chumbo. O pior desempenho notado foi para estabilizar o elemento alumínio. Porém, levando em consideração que a matriz com a qual o bloco foi produzido, também é composta por outros elementos, entre eles o cimento Portland, é provável que parte do alumínio presente na solubilização dos blocos advenha do cimento.

Outra maneira de analisar o resultado da eficiência de estabilização é comparar os percentuais da matriz 1:3 com os percentuais dos blocos, conforme Tabela 39. No caso dos elementos: alumínio, sódio e sulfatos, é notável que a matriz foi mais eficiente do que os blocos. Somente o elemento chumbo foi melhor encapsulado nos blocos, com eficiência de 100%, enquanto que na matriz a eficiência foi de apenas 89%.

ELEMENTO	EFICIÊNCIA DE ESTABILIZAÇÃO (%)		
	MATRIZ 1:3 (cinza como parte do agregado)	BLOCO DE CINZA 28 dias	BLOCO DE CINZA 90 dias
ALUMÍNIO	38	0	1
BÁRIO	99	99	100
CÁDMIO	100	97	100
CHUMBO	89	100	100
FENÓIS TOTAIS	100	33	100
SÓDIO	61	41	50
SULFATOS	97	84	85

Tabela 39: Comparação entre os percentuais de eficiência de estabilização.

Fonte: acervo da autora, 2011.

4.7. COMPOSIÇÃO ALTERNATIVA

Diante dos resultados observados na solubilização dos blocos, decidiu-se investigar mais uma composição, buscando alternativas para tornar o componente inerte. Para essa etapa propomos uma composição 1:3 (uma parte de cimento para três partes de agregado), sendo o agregado 70% areia e 30% cinza. Com esse traço foram produzidos corpos-de-prova 50x100mm, que foram avaliados mecânica e quimicamente. Para isso, foram executados os ensaios de resistência à compressão e análise do extrato solubilizado com idade de 28 dias.

Na análise mecânica de resistência à compressão (Tabela 40), os resultados obtidos apontam uma média de 23,7 MPa, ficando bem acima da média obtida com a matriz adequada, que utilizou 50% de cinza no agregado, que teve média de 12,9 MPa. Esses valores representam um ganho de 45,5% na resistência, quando diminuimos a quantidade de cinza volante na argamassa, com mesma idade de ruptura.

ARGAMASSA	CORPO DE PROVA	Carga (tf)	Resistência aos 28 dias (Mpa)
1:3 - 30% cinza volante	P1	4,7	23,9
	P2	4,3	21,7
	P3	5,0	25,5
	P4	4,6	23,5
Média			23,7

Tabela 40: Resultado-resistência à compressão matriz 1:3 30% cinza volante

Fonte: acervo da autora, 2011

Na análise química, a matriz foi submetida ao ensaio de solubilização e, apesar do percentual de cinza volante ser menor na matriz, ainda continua aparecendo elementos que estão acima do limite máximo imposto por norma, conforme Tabela 41, onde podemos observar a presença dos elementos: alumínio, chumbo, cromo total e sulfatos.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO MATRIZ 1:3 30% DE CINZA COMO AGREGADO
ALUMÍNIO	0,2	5,39
ARSÊNIO	0,01	LD
BÁRIO	0,7	LD
CÁDMIO	0,005	LD
CHUMBO	0,01	0,05
CIANETOS	0,07	LD
CLORETOS	250	18
COBRE	2	LD
CROMO TOTAL	0,05	0,122
FENÓIS TOTAIS	0,01	LD
FERRO TOTAL	0,3	0,264
FLUORETOS	1,5	0,05
MANGANÊS	0,1	0,005
MERCÚRIO	0,001	LD
NITRATOS	10	0,95
PRATA	0,05	0,008
SELÊNIO	0,01	LD
SÓDIO	200	99
SULFATOS	250	355
SURFACTANTES	0,5	LD
ZINCO	5	0,046

LD: Limite de detecção

Tabela 41: Resultado solubilização matriz 1:3 com 30% de cinza volante

Fonte: Laboratório de Saneamento-EESC-USP, 2011. Adaptado pela autora.

Comparando os resultados das solubilizações da cinza *in natura*, e das matrizes com 50% e 30% de cinza compondo o agregado (conforme Tabela 42), é possível notar a gradativa diminuição dos elementos: alumínio, bário, cádmio, chumbo, fenóis totais, sódio e sulfatos, com a também gradativa diminuição de cinza volante na composição. Porém, também é possível observar resultados dispersos dessa lógica, como é o caso do cromo total que apresentou resultado de 0,122 mg/L na matriz com 30% de cinza, que é maior que o resultado da cinza *in natura*.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	RESULTADO CINZA IN NATURA	RESULTADO MATRIZ 1:3 50% DE CINZA COMO AGREGADO	RESULTADO MATRIZ 1:3 30% DE CINZA COMO AGREGADO
ALUMÍNIO	0,2	18,66	11,52	5,39
BÁRIO	0,7	12,49	0,15	LD
CÁDMIO	0,005	0,174	LD	LD
CHUMBO	0,01	1,44	0,16	0,05
CROMO TOTAL	0,05	0,022	LD	0,122
FENÓIS TOTAIS	0,01	0,042	LD	LD
SÓDIO	200	388,4	150,5	99
SULFATOS	250	3400	100	355

LD: Limite de detecção

Tabela 42: Comparação – solubilizações: cinza in natura, matriz 1:3 50% e matriz 1:3 30%
Fonte: acervo da autora, 2011.

Fazendo a análise da eficiência de estabilização, identificamos índices bem altos, todos acima dos 70%, e três elementos 100% estabilizados, como pode ser visto na Tabela 43.

ELEMENTO	MATRIZ 1:3 (30% de cinza como parte do agregado)
	EFICIÊNCIA DE ESTABILIZAÇÃO (%)
ALUMÍNIO	71
BÁRIO	100
CÁDMIO	100
CHUMBO	97
CROMO TOTAL	0
FENÓIS TOTAIS	100
SÓDIO	75
SULFATOS	90

Tabela 43: Eficiência de estabilização da matriz com 30% de cinza como agregado
Fonte: acervo da autora, 2011

Capítulo

Discussão dos Resultados

5

5.1. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO

A classificação II-A, não-perigoso e não-inerte, indica que o material analisado deve receber algum tratamento para estabilização dos elementos nocivos, com o intuito de torná-lo inerte. Sendo assim, a pesquisa adotou a técnica de estabilização em matrizes cimentícias com o objetivo de minimizar a presença de tais substâncias. Dos elementos em destaque na Tabela 10 do item 4.1.2, dois são considerados metais pesados: cádmio e chumbo. Segundo Biancovilli (2006) as duas substâncias são bio-acumulativas: uma vez que se instalam no organismo, dificilmente sairão, sendo que a contaminação acontece de maneira imperceptível e, quando em níveis pequenos, é assintomática. Os sintomas começam a aparecer apenas no momento em que as taxas destas substâncias ultrapassam os limites do aceitável. Segundo Cláudio²⁹ (1987 *apud* OLIVEIRA, 1996.p 8) o cádmio e o chumbo são considerados os mais tóxicos metais pesados, tendo a capacidade de acumular-se, nos seres humanos, principalmente nos rins e fígado.

Aparecem também os metais bário e alumínio, esse último com destaque, pois o resíduo é gerado por uma indústria produtora de alumina e alumínio, e ainda que o equipamento que gera o resíduo não entre em contato com a produção de alumínio, pode ocorrer a contaminação pelas poeiras atmosféricas. O bário só se torna perigoso na forma do cloreto de bário, apresentando algumas reações pela inalação ou contato com a pele. O alumínio em geral consegue ser eliminado naturalmente do organismo. Os fenóis são elementos químicos que merecem atenção, pois são responsáveis por alguns males à saúde humana, segundo laudos divulgados por indústrias químicas, o fenol, que pode ser chamado também de ácido fênico, é uma substância nociva.

Segundo Pablos (2008.p 36), em excesso, os sulfatos (SO_3) podem ser prejudiciais à argamassa, pois promovem expansão volumétrica e perda de resistência mecânica. Na produção do cimento Portland é comum a presença dessa substância, mas o teor máximo aceito é de 3%. Neville (1982.p 70) também relata as reações conhecidas como ataque por sulfatos, e destaca que os sais mais particularmente ativos são os sulfatos de sódio e de magnésio. Sendo assim, podemos concluir que, a presença de sódio e de sulfatos

²⁹ CLÁUDIO, J. R. Resíduos Sólidos perigoso. Solidificação de lamas tóxicas com cimentos. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1987.

identificada em grandes quantidades pelo ensaio de solubilização, pode prejudicar as argamassas feitas com o resíduo.

Na tentativa de entender a origem de tais substâncias presentes na cinza, foram analisadas as matérias-primas que a compõem. Confrontando os resultados dessas matérias-primas com o resultado da cinza, conforme Tabela 44, o que foi possível observar é que tais análises não explicam a presença de todas as substâncias nocivas. Os elementos bário, sódio e os sulfatos têm presença muito tímida nas matérias-primas e em contrapartida, na cinza, esses mesmos elementos apresentam teores altos.

PARÂMETRO	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO SOLUBILIZADO mg/L	AREIA	CALCÁRIO	CARVÃO 001	CARVÃO SIZEDT	CINZA VOLANTE
ALUMÍNIO	0,2	0,43	3,35	0,12	0,64	18,66
BÁRIO	0,7	LD	0,05	0,08	0,03	12,49
CÁDMIO	0,005	0,005	0,004	LD	0,008	0,174
CHUMBO	0,01	0,05	0,12	0,01	0,02	1,44
FENÓIS TOTAIS	0,01	0,038	0,029	LD	0,07	0,042
FERRO TOTAL	0,3	0,526	0,132	0,454	0,79	0,2
MANGANÊS	0,1	LD	0,006	0,389	LD	0,038
SÓDIO	200	0,9	2,1	2,6	27,2	388,4
SULFATOS	250	1	13	105	68	3400

Tabela 44: Resultado solubilizações: cinza volante e matérias-primas que a compõem.
 Fonte: acervo da autora, 2011

Esses resultados, da solubilização das matérias-primas, levam a crer que no momento da queima no reator de leito fluidizado, acontecem reações químicas que modificam o teor da cinza. Outra hipótese é a da contaminação da cinza no momento de seu armazenamento, pois isso justificaria a presença de elementos que não aparecem em nenhum dos materiais que a compõem.

Para corrigir a presença de tais substâncias foi utilizada a técnica de estabilização/solidificação, que segundo Freeman et al (1995 *apud* OLIVEIRA, 2003.p 27), refere-se à técnica que reduz quimicamente o potencial de periculosidade de um resíduo por transformar o elemento para uma forma menos solúvel, móvel e tóxica. A idéia é encapsular essas substâncias nocivas nas matrizes de cimento. “Encapsulamento é um processo que envolve o revestimento ou enclausuramento de uma partícula tóxica ou um

aglomerado de resíduos com uma nova substância, isto é, com um aditivo solidificante” (WILES, 1989 *apud* OLIVEIRA, 2003.p 27).

5.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA CINZA

5.2.1 Difração de raios-x

Dos sete compostos encontrados na cinza *in natura*, quatro se referem a formas cristalinas da sílica (SiO_2), conforme Figura 15, esse que é um dos elementos mais presentes em toda a superfície terrestre é também um indicador de que o resíduo poderia ser aproveitado em matrizes de cimento Portland. “O dióxido de silício é o composto binário de oxigênio e silício mais comum, sendo inclusive composto dos dois elementos mais abundantes na crosta da Terra. A sílica e seus compostos constituem cerca de 60% em peso de toda a crosta terrestre.” (ZIRTEC³⁰, 2010). Segundo Pablos (2008.p 81) adicionar sílica ativa em argamassa de cimento Portland tem o objetivo de obter matrizes mais compactas e menos porosas, melhorando a estabilização física e química. “O efeito físico é devido à forma esférica das partículas e sua extrema finura, com um diâmetro médio 100 vezes menor que o do cimento, que atua como um microfíler, com preenchimento dos espaços vazios deixados durante a hidratação do cimento” (VASKE et al., 2008.p 79). A sílica presente na cinza também poderia reagir com a cal livre presente no cimento, ajudando assim nas reações cimentantes, mas para isso seria necessário que a sílica estivesse em estado amorfo, e o que é observado no resultado da amostra são tipos cristalinos.

Outro importante composto presente na difração de raios-x da cinza é a gipsita. Esse elemento é comum na produção de cimento. Sua adição tem o objetivo de retardar o início de pega do cimento, tornando possível de ser manuseado. A presença desse composto é bem pequena, ele apresenta picos curtos, por isso não faria tanta diferença a sua presença na matriz.

Foi identificado também um pico longo de ortofosfato de alumínio, confirmado pela grande presença de alumínio no resultado da solubilização. A presença desse elemento pode causar a formação dos aluminatos de cálcio. Segundo Neville (1982.p 16)

³⁰ **Sílica.** Documento eletrônico. Disponível em: <http://www.zirtec.com.br/areia/silica.htm>. Acesso em 3 de junho de 2010.

a reação de um aluminato de cálcio com água causa um enrijecimento imediato da pasta, quando se trata do cimento. E segundo Pablos (2008.p 36) os aluminatos tricálcicos possuem pega rápida e baixa resistência à compressão. Para controle da pega rápida é acrescentado sulfato de cálcio (Max. 3% da massa de clínquer).

A presença do composto chamado gismondine, que é um material mineral no estado vítreo³¹, também poderia apontar que a cinza volante teria alguma propriedade pozolânica, dada sua presença em grande quantidade na amostra. E para verificar essa possível propriedade pozolânica foram feitos os ensaios para aferir essa potencialidade.

5.2.2 Potencial pozolânico

O potencial pozolânico foi identificado a partir de cinco ensaios: teor de finura do material, teor de umidade, perda ao fogo, pozolanicidade com cimento e pozolanicidade com cal. Os parâmetros para essas análises são determinados pela NBR 12653/1992, norma vigente de materiais pozolânicos. Os cinco resultados deixaram claro que o material não pode ser denominado como pozolânico, apesar do potencial pozolânico apresentado em um dos ensaios.

O primeiro dado levantado para analisar o potencial de pozolanicidade foi a finura do material, o resultado apontou 13,73% de material retido na peneira 75µm. O parâmetro da NBR 12653/1992 é de no máximo 34%, sendo esse um resultado positivo para a análise de pozolanicidade. Esse dado se torna importante também porque “as cinzas volantes além de apresentarem granulometria mais fina, são resfriadas mais rapidamente, apresentando composição mineralógica predominante vítrea.” (JOHN et al 2003.p 157), o que possibilita a reação pozolânica ou aglomerante.

A perda ao fogo apresentou resultado de 30%, enquanto o parâmetro indica percentual máximo de 6%. Esse resultado pode estar relacionado à quantidade de material orgânico presente na amostra. Em geral, alto percentual de perda ao fogo significa que há presença de componentes orgânicos e ainda a presença de altos teores de carbono, o que pode aumentar a quantidade de água requerida para hidratação das argamassas e influenciar na resistência à compressão. O baixo percentual de perda ao

³¹ Informação disponível em: <http://www.mindat.org/min-10315.html>. Acesso em 12 de novembro de 2010.

fogo apontaria que a amostra é potencialmente mineral. O teor de umidade observado no ensaio foi de 2,04%, ficando dentro do parâmetro da norma que indica percentual máximo de 3%.

O ensaio de pozolanicidade com cimento apresentou resultado de 64,94%, não atingindo os mínimos 75% exigidos por norma e o ensaio de pozolanicidade com cal teve resultado de 0,8 MPa, não atingindo o mínimo de 6 MPa. Esses dois resultados são os mais importantes para esse tipo de análise, pois indicam como o material está reagindo na presença de água e do hidróxido de cálcio. A NBR 12653 define material pozolânico como aquele finamente dividido, e que na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

Segundo Nogueira e Sichieri (2011a) os resultados apontam que a cinza em questão não é um material pozolânico, pois dos cinco ensaios executados, apenas dois resultados ficaram dentro dos parâmetros estabelecidos por norma. Apesar de ser um material com partículas finamente divididas e com grande potencial de pozolanicidade com cimento, não é possível afirmar sua característica aglomerante.

5.3. ESTUDOS PRELIMINARES DAS MATRIZES DE CIMENTO E CINZA

5.3.1 Avaliação mecânica das matrizes

Os estudos preliminares foram feitos a partir da análise de matrizes de cimento Portland com adição de cinza utilizada como aglomerante. Foram delimitadas três matrizes, com 25%, 50% e 75% de cinza. Analisando os resultados é possível afirmar que matrizes feitas com altos percentuais de cinza não poderão ser adotadas, pois a tendência é a queda da resistência média proporcionalmente ao acréscimo de cinza na argamassa, como pode ser visto no Gráfico 5.

De acordo com o gráfico a adição de apenas 25% de cinza, como parte do aglomerante na matriz, já ocasionou uma queda de 35% na resistência à compressão. Quando o percentual de cinza passa para 50% do total de material aglomerante, essa queda chega quase a 60%. Esse resultado aliado aos resultados de atividade pozolânica, já citados no item anterior, reafirmam que a cinza volante estudada não poderá ser utilizada como aglomerante.

Gráfico 5: Resistência média em MPa aos 28 dias – matrizes compostas com cinza volante

Fonte: acervo da autora, 2010

5.3.2 Eficiência de estabilização das matrizes

Para essa fase da pesquisa foram feitos dois ensaios com o objetivo de identificar a eficiência de estabilização: análise dos extratos lixiviado e solubilizado, e ainda a difração de raios-x.

Para analisar a eficiência de estabilização foram executados os ensaios de lixiviação e solubilização nas matrizes com 25%, 50% e 75% de cinza volante. Mas, somente o resultado da solubilização apontou elementos que ultrapassaram os limites. Sendo assim, a análise foi feita comparando os resultados obtidos para a cinza *in natura* com os resultados das matrizes, conforme apresentado na Tabela 19.

Dos sete elementos que ultrapassaram o limite máximo no extrato solubilizado da cinza volante *in natura*, quatro foram estabilizados em todas as matrizes de cimento Portland. Um não foi encapsulado por nenhuma das matrizes. Outro foi encapsulado pela matriz 75%, mas não pelas restantes. E o último foi encapsulado pelas matrizes de 25% e 50%, mas não pela de 75%.

Os quatro elementos totalmente encapsulados são: bário, cádmio, chumbo e sódio. Sendo que, o cádmio e o chumbo foram totalmente incorporados pela matriz, ficando no limite de detecção, e outros elementos ficaram abaixo do limite permitido.

Dos três elementos restantes apenas um não foi encapsulado por nenhuma das matrizes, o alumínio. Mas foi observado que, na matriz com 50%, sua presença caiu pela

metade, de 18,66 para 9,82. Já na matriz com 25% foi detectado pouco menos que a terça parte do que foi observado na cinza *in natura*. O resultado obtido na matriz de 75% parece destoar com o restante dos resultados, pois apresenta uma pequena quantidade de alumínio onde tem a maior presença de cinza na matriz. Diante desse resultado, seria possível afirmar então, que o alumínio presente nas outras matrizes pode ser proveniente do cimento, já que a matriz que apresenta maior quantidade de cinza e menor quantidade de cimento é aquela que apresentou também menor quantidade de alumínio.

Os fenóis totais foram totalmente encapsulados pela matriz com 75%, sendo seu resultado o limite de detecção. Já nas matrizes com 25% e 50% esse elemento continua presente, com valores bem próximos do que foi observado na análise da cinza.

Os sulfatos foram encapsulados nas matrizes com 25% e 50%, sendo que o melhor desempenho foi observado na matriz com 25% onde foi colocado apenas o limite de detecção. Na matriz com 50% o resultado ficou abaixo do limite máximo no extrato, e com esse resultado é possível observar a grande capacidade de estabilização/solidificação que a matriz apresentou, ele passou de 3400 para apenas 92, uma eficiência de 97%. Já a matriz com 75% de cinza não teve a capacidade de encapsular os sulfatos, mas demonstrou grande desempenho ao diminuir de 3400 para 480 a presença desse elemento, conseguindo diminuir em mais de 85% sua detecção.

Apesar de todos esses resultados satisfatórios, as matrizes não foram capazes de estabilizar todos os elementos nocivos de maneira que essas ficassem inertes. Sendo assim, pode-se afirmar que as matrizes propostas são de Classe II-A, não-perigosas e não-inertes.

A difração de raios-x teve o objetivo de identificar os compostos formados com a adição da cinza volante nas matrizes de cimento Portland. Nos resultados foram encontrados vários compostos formados nas matrizes com 25%, 50% e 75% de cinza. E comparando com o gráfico da difração na cinza *in natura* é possível avaliar quais elementos permaneceram ou reagiram com outros materiais nas matrizes.

De todos os compostos identificados o mais presente foi a sílica (SiO_2), presente nas difrações da cinza volante e de todas as matrizes. Como pode ser visto na Tabela 45, foram identificados basicamente quatro tipos de sílica, todos eles na forma cristalina: quartzo, moganita, tridimita e lutcita.

composto	Cinza volante <i>in natura</i>	Matriz 25% cinza	Matriz 50% cinza	Matriz 75% cinza
SiO ₂	Quartzo Moganita Tridimita	Quartzo Moganita Lutecita	Quartzo Óxido de silício	Quartzo Moganita Lutecita

Tabela 45: Difração de raios-x - Presença de sílica

Fonte: acervo da autora, 2010

Os outros compostos identificados na cinza volante *in natura*, além da sílica, são: gipsita CaSO₄ 2H₂O; hematita Fe₂O₃; berlinita AlPO₄; gismondine CaAl₂ Si₂O₈ 4H₂O. Na difração feita nas matrizes com percentuais de cinza, somente um desses compostos foi identificado, a berlinita, ficando claro que ocorreram reações químicas, havendo um rearranjo dos outros compostos.

Na matriz com 25% de cinza volante foram identificados apenas quatro compostos, sendo três tipos de sílica e um composto onde aparece o cálcio, o hillebrandite Ca₂ (SiO₃) (OH)₂, formando um tipo de silicato de cálcio, muito comum em matrizes cimentícias. Os outros elementos foram, provavelmente, encapsulados na matriz.

Na matriz com 50% de cinza volante foram identificados cinco compostos, desses cinco, dois são sílicas, um é o composto identificado na cinza *in natura*, a berlinita. E os outros compostos apresentam novas reações como o sulfeto de silício SiS₂ e o afwillite Ca₃ (SiO₃ OH)₂ 2H₂O .

Na matriz com 75% de cinza volante foram identificados seis compostos, desses, três são sílica. Desses três, dois são silicatos de cálcio hidratado, uma reação típica em matrizes de cimento, pois é a reação da sílica com o cálcio na presença da água, que configura uma reação cimentante. Temos ainda, a presença da calcita CaCO₃, carbonato de cálcio, que é o resultado de uma reação entre o óxido de cálcio e o dióxido de carbono.

5.4. ADEQUAÇÃO DAS MATRIZES

Com essa fase da pesquisa avaliamos outra forma de utilização da cinza. Já que, as análises das matrizes que utilizaram a cinza como aglomerante não ofereceram

resultados satisfatórios, ela foi aplicada na matriz de cimento Portland como parte do agregado. Para essa fase, depois de alguns testes iniciais, foram delimitados três traços: 1:1, 1:2 e 1:3. Cada traço com duas variações em relação ao percentual de cinza que compôs a matriz, ou seja, o agregado foi dividido em: 50% cinza e 50% areia ou 70% cinza e 30% areia. Sendo assim, foram avaliadas seis composições, conforme já colocado no item 4.4 e ainda uma matriz padrão de cada traço para efeito de comparação. Para aferir o desempenho dessas composições foi adotado o ensaio de resistência à compressão, cujos resultados estão colocados no Gráfico 6.

Gráfico 6: Gráfico comparativo de resistências à compressão.

Fonte: acervo da autora, 2010

No caso da matriz de composição 1:1 a média dos resultados foi satisfatória. A matriz composta com 50% de cinza como agregado teve resistência média de 41,3 MPa, ou seja, houve uma queda de apenas 16% na resistência média em relação à argamassa padrão. Já na matriz composta com 70% de cinza como agregado a queda foi de 41% na resistência média, tendo uma média de 29 MPa.

Na composição 1:3 com 50% de cinza como agregado o resultado foi significativo, a média foi de 12,9 MPa, sendo a queda de apenas 17% em relação à argamassa padrão, apesar de ser um traço pobre em cimento. A matriz 1:3 com 70% de

cinza como agregado, foi a única descartada, dada sua característica de grande expansão que prejudicou a moldagem dos corpos-de-prova.

Buscando um ponto de equilíbrio entre esses dois traços, foram testadas as matrizes com composição 1:2. O resultado da resistência à compressão para as duas matrizes demonstrou grande queda em relação à argamassa padrão. A argamassa composta com 50% de cinza apresentou média de resistência de 19,2 MPa, sendo uma queda de 59,7% na resistência à compressão. E a argamassa composta com 70% de cinza apresentou média de resistência de 16,4 MPa, sendo uma queda de 65,6%. O que ainda pode ser analisado é que a média das resistências entre as composições, com 50% e 70% de cinza, pouco varia, apenas 5,9%. Existe uma grande queda na comparação com a argamassa padrão, mas quando a comparação é feita entre os percentuais de adição de cinza, pouco muda o resultado da resistência à compressão.

Outras análises de comparação dos resultados entre as três composições podem ser feitas observando o Gráfico 6. Primeiro é possível observar que os traços padrão das argamassas 1:1 e 1:2 apresentam resultados muito próximos, mas que em contrapartida existe uma distância muito grande entre os resultados quando são adicionados 50% de cinza nas composições. É possível também observar que nas composições 1:2 e 1:3 com adição de 50% de cinza como agregado, os resultados também são muito próximos, assim como já foi dito das duas composições do traço 1:2.

Diante dos resultados foi possível escolher uma composição para continuar a fase de experimentação: o traço 1:3 com 50% de cinza volante como agregado. Esse traço foi escolhido por apresentar bom desempenho mecânico com média de resistência à compressão de 12,9 MPa, sendo uma média muito superior ao que a norma de blocos prensados exige, e também porque o percentual de queda na resistência em relação à matriz padrão foi de apenas 17%. Foi escolhido ainda por ser uma composição onde grande quantidade de resíduo pode ser encapsulada na matriz de cimento. Por esses motivos essa composição foi eleita para seguir nas fases futuras.

Com a matriz eleita foram feitos outros ensaios para aferir o desempenho da composição. O ensaio de solubilização demonstrou que essa matriz ainda não é capaz de estabilizar/solidificar todos os elementos nocivos, porém é notável sua eficiência, diminuindo significativamente a presença de alguns elementos e até mesmo

estabilizando totalmente outros, como visto na Tabela 25, onde é possível observar que apenas três elementos ultrapassaram o limite da norma, sendo possível encapsular quatro dos elementos presentes na cinza *in natura*. Dos quatro estabilizados/solidificados, dois ficaram dentro do limite de detecção, o que pode ser considerado como 100% de estabilização. A Tabela 26, já apresentada nos resultados, apresenta os percentuais de eficiência de estabilização.

Dos sete elementos detectados na cinza volante, dois foram totalmente estabilizados: o cádmio e os fenóis totais. Os elementos sódio, com índice de 61% de estabilização, e sulfatos, com índice de 97%, foram estabilizados ficando dentro dos limites impostos pela norma. Já os elementos bário e chumbo, com índice de 99% e 89% de estabilização respectivamente, apesar de apresentarem altos índices, não foram estabilizados. O único elemento que apresentou índice abaixo de 50% foi o alumínio, com 38% de estabilização. Esses resultados demonstram que a matriz de composição 1 : 1,5 : 1,5 (cimento:areia:cinza) apresenta uma capacidade de estabilização/solidificação total de 83%, esse índice é alto se considerarmos que na argamassa temos apenas 25% de cimento para 37% de cinza volante em massa, e mais ainda quando lembramos que o cimento utilizado é do tipo CP III, um tipo produzido com menos clínquer, que é o produto que atua na função de encapsular.

Após conhecer o desempenho mecânico e a eficiência de estabilização da matriz eleita, fez-se necessário identificar algumas outras características que são de suma importância para a seqüência do trabalho, com a etapa de produção dos blocos. Um desses dados foi o conhecimento do tempo de pega, pois essa característica interfere na produção e tempo de cura inicial dos blocos. Principalmente, porque a argamassa conta com o cimento CP III, um tipo que apresenta propriedade de tempo de pega maior que dos outros tipos de cimento. E ainda, por conta de uma característica particular da cinza volante estudada, o material apresenta muito sulfato em sua composição, substância que retarda a pega. Os resultados ficaram dentro do esperado, enquanto o cimento apresenta início de pega com 5 horas e 15 minutos, a pasta de cimento mais cinza apresenta início de pega com 9 horas e 15 minutos, 4 horas a mais, sendo o fim de pega com 13 horas e 10 minutos. Deixando claro que a cinza retarda a pega. Diante desse dado, foi possível prever que a cura inicial dos blocos precisaria acontecer no local da moldagem por pelo

menos 24 horas, para garantir o sucesso no transporte. Outra avaliação feita nessa composição foi a permeabilidade, aferida através do ensaio de permeabilidade ao ar. Com essa avaliação foi possível antecipar as características de durabilidade do bloco produzido. A alta porosidade, ou permeabilidade, permite que agentes deletérios entrem nos elementos construtivos e prejudiquem sua durabilidade. Segundo Castro e Pandolfelli (2009.p 30) com a introdução de adições minerais, as características de permeabilidade e porosidade, das argamassas, são reduzidas. Porém, nesse caso, constatamos o contrário. Os resultados apontam que a amostra da composição com cimento, cinza e areia é bem mais porosa que a amostra de referência produzida sem a cinza volante, apresentando pelo menos o dobro de permeabilidade. A hipótese é que a grande área superficial, devido a característica pulverulenta da cinza volante, tenha interferido no empacotamento das partículas maiores e conseqüentemente na permeabilidade da matriz. Esse resultado indica que tal argamassa não seria recomendada para elementos construtivos produzidos com ferragens, dada a possibilidade da invasão de agentes que possam causar a corrosão.

5.5. PRODUÇÃO E DESEMPENHO DOS BLOCOS

Durante o processo de produção dos blocos, destacou-se a fase preliminar para acerto da água. Foi possível observar o quão importante é essa etapa, pois quando testamos a argamassa em corpos-de-prova, ainda que a consistência já fosse a consistência seca para prensagem, utilizamos uma quantidade de água adequada para a moldagem manual. Já para moldar os blocos, tivemos que adequar a quantidade de água para moldagem numa prensa automática com capacidade de prensagem de três toneladas. Foi preciso moldar vários blocos para chegar a esse ponto ótimo de consistência seca, até conseguir moldar blocos sem encharcamento e com superfície lisa e bem acabada. A cura inicial teve que acontecer na área de produção, pois conforme já antecipado pelo ensaio de tempo de pega, a argamassa produzida com cinza tem início de pega retardado. Sendo assim, nas primeiras horas de cura, os blocos apresentavam aspecto frágil e foi necessário fazer umectação durante as primeiras 24 horas, sendo o transporte retardado para dois dias após a moldagem.

Os blocos produzidos apresentaram bom desempenho. Na avaliação mecânica através do ensaio de resistência à compressão, os resultados estão acima do exigido por norma, tanto com idade de 28 quanto de 90 dias. E na avaliação física através do ensaio de absorção de água por imersão, somente na idade de 28 dias os resultados ficaram fora do estabelecido pela norma, com alterações sutis. Esse dado já foi antecipado pelo ensaio de permeabilidade ao ar, que demonstrou alta porosidade da argamassa produzida com cinza volante. Já a análise de contaminação dos blocos, através do ensaio de solubilização, não apresentou resultados satisfatórios. O bloco com idade de 28 dias ainda apresentou solubilizado com seis parâmetros acima do limite máximo colocado pela norma, e o bloco com idade de 90 dias apresentou três parâmetros acima do limite, sendo que nas duas análises ainda estão presentes elementos como cromo e cádmio, que são prejudiciais à saúde humana. Por outro lado, a eficiência de estabilização dos blocos, principalmente do bloco com 90 dias de cura, apresenta índices altos de estabilização/solidificação dos elementos nocivos, conforme apresentado na Tabela 38 do item 4.6.3, onde é possível observar que, dos sete elementos que ultrapassaram o limite máximo no solubilizado da cinza *in natura*, quatro foram totalmente estabilizados/solidificados, apresentando índice de 100%.

Considerando a utilização do bloco de cinza volante para vedação, alvenaria não-estrutural, é possível analisar qual seria a economia de material convencional (areia), já que a cinza está sendo utilizada como parte do agregado. Seguindo o traço eleito na pesquisa, 1:3 (sendo uma parte de cimento, 1 e $\frac{1}{2}$ parte de areia e 1 e $\frac{1}{2}$ parte de cinza volante) é possível reduzir em 50% a utilização de agregado, considerando a comparação com um bloco produzido apenas com materiais convencionais. Para cada bloco produzido são utilizados 1,2 kg de resíduo, sendo economizados também 1,2 kg de areia. Considerando as dimensões do bloco produzido, cada metro quadrado de parede utiliza 48 blocos, sendo assim conclui-se que para cada metro quadrado construído são economizados mais de 57 kg de areia. Considerando que uma habitação mínima tenha 120 m² de alvenaria, são economizados, por unidade habitacional, quase 7 t de areia, ou 4,6 m³ (considerando que a massa específica da areia média lavada é 1,5 t/m³). Em média, o custo do m³ da areia média lavada é R\$ 60,00, sendo assim, a economia seria de R\$ 275,00 por unidade habitacional mínima.

A importância dessa economia de agregado está diretamente ligada aos impactos ambientais. “Agregados são as substâncias minerais mais consumidas no mundo. Com a transferência maciça da população para as cidades e conseqüente crescimento das cidades, mais e mais agregados serão necessários.” (BRASIL, 2009.p 24). Dados do Ministério de Minas e Energia, disponíveis no Relatório Técnico 31 de 2009, mostram a evolução da extração de areia no Brasil, em 2005 foram extraídos $196 \cdot 10^6$ t, já em 2008 foram extraídos $279 \cdot 10^6$ t, um crescimento de 42% em três anos. Essa extração, em grande escala, impacta no ecossistema dos rios, na qualidade do ar e até mesmo na população que vive no entorno das minas.

Para fazer uma estimativa de quanto seria possível produzir de blocos com a geração anual de cinza, utilizamos o consumo do material para produzir cada bloco. A estimativa de geração de cinza volante pelo reator de leito fluidizado é de 20.000t/ano. Para produzir um bloco são necessários 1,2 kg de cinza. Sendo assim, para produzir um milhão de blocos são necessários 1,2 t de cinza. Logo, com esse total anual de 20.000t é possível produzir aproximadamente 16.660 milhões de blocos/ano. Considerando que o m^2 de alvenaria com esse tipo de bloco consome 48 unidades, com 1000 blocos (um milhão) é possível construir aproximadamente $20,8 m^2$ de alvenaria. Com o total de cinza gerada por ano é possível construir aproximadamente $346.528 m^2$ de alvenaria. Considerando ainda, que uma unidade habitacional mínima consome cerca de $120m^2$ de alvenaria, seria possível construir cerca de 2.880 unidades habitacionais mínimas com a produção anual desse resíduo.

Capítulo

Conclusões

Conclusões da Pesquisa:

- O resíduo sólido, cinza volante de reator de leito fluidizado, apresenta classificação Classe II-A.
- De acordo com as normas brasileiras de resíduos sólidos seu uso, em matrizes cimentícias, é possível desde que a matriz seja capaz de estabilizar os elementos nocivos ao meio ambiente e a saúde humana.
- Analisando a matéria-prima que compõem o resíduo, identificou-se que nem todos os elementos presentes na cinza estão presentes nas matérias-primas (carvão mineral, areia e calcário dolomítico). Sendo assim, concluí-se que o processo, o armazenamento ou o transporte podem estar contribuindo para a contaminação da cinza volante. Neste caso, a empresa precisa verificar seus procedimentos.
- É indicado que o material seja utilizado como agregado ou *filler*, dada sua característica de não pozolânico, que foi confirmada através de ensaios feitos com cimento e cal. Sendo que suas outras características químicas e físicas tornam viável sua utilização como *filler*.
- É necessário que a matriz produzida com a cinza volante sempre utilize cimento do tipo RS (resistente a sulfatos), pois o resíduo em questão apresentou altas quantidades de sulfatos.
- Constatou-se a influência da cinza volante no desempenho mecânico das matrizes, pois quanto maior é a quantidade de cinza menor é a resistência à compressão.
- Concluímos que o traço 1 : 1,5 : 1,5 (cimento : areia : cinza) atendeu às exigências mecânicas e também apresentou alta eficiência de estabilização quanto aos elementos nocivos presentes na cinza. Porém, a matriz ainda apresentou parâmetros acima do estabelecido pela norma de resíduos sólidos.

- Como comprovam ensaios posteriores, a diminuição do teor de cinzas para 30% do agregado melhora em muito a eficiência da estabilização da matriz. No entanto, não foi possível desenvolver blocos com esse traço.
- Constatamos a gravidade da presença de contaminantes no cimento utilizado, o CP III, aparentemente já contaminado de fábrica. O ensaio de solubilização da matriz branca (sem a presença de cinza) classificou essa matriz como classe II-A, indicando que o cimento está contaminado e deveria ser destinado para aterro industrial.
- A cinza volante interfere nas características de permeabilidade e também no tempo de pega da matriz.
- Os blocos produzidos atendem às exigências mecânicas de resistência à compressão e de absorção de água, estabelecidos pela norma de solo-cimento para vedação não estrutural.
- Com a geração anual de cinza é possível produzir cerca de 346.500 m² de alvenaria, ou cerca de 2.880 unidades habitacionais mínimas.

Recomendações para produção e uso do bloco:

- Para produzir os blocos é necessário dosar a quantidade de água para obter o ponto de prensagem, ou consistência seca, de acordo com a capacidade da prensa. Recomenda-se sempre testar a água antes de iniciar a produção.
- Mesmo utilizando cimento do tipo RS (resistente a sulfatos), ainda há grande presença de sulfatos no resultado das análises dos blocos. Sendo assim, é recomendável que os blocos sejam utilizados com algum tipo de impermeabilização ou revestimento, isso poderá evitar problemas com a formação de etringita, que aparece ao longo do tempo na presença de umidade e pode causar aumento de volume e expansão, surgindo fissuras.

- Os blocos produzidos com 50% de cinza na composição do agregado apresentaram alta eficiência de estabilização quanto aos elementos nocivos presentes na cinza volante, principalmente na idade de 90 dias. Mas, vários parâmetros ainda estão acima do limite colocado pela norma de classificação de resíduos. Sendo assim, recomenda-se diminuir o percentual de cinza na produção dos blocos.

Sugestões para continuação da pesquisa:

- Utilizar aditivos para compor as argamassas produzidas com cinza volante. O objetivo é reduzir a quantidade de água na mistura, para que a argamassa fique mais densa, ou menos porosa. Segundo Castro e Pandolfelli (2009.p 28) o alto desempenho de argamassas e concretos é alcançado quando aditivos químicos e adições minerais são usados simultaneamente. “Os aditivos permitem uma redução substancial da água de mistura e, assim, o tamanho dos poros e a quantidade de ar aprisionado são reduzidos, criando-se uma microestrutura mais densa quando no estado endurecido.” (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009.p 28).
- Sugerimos a criação de normas técnicas específicas, que estabeleçam procedimentos para produção de elementos construtivos baseados em matrizes de cimento e resíduo, principalmente normas que estabeleçam parâmetros para materiais que passaram pela tecnologia de estabilização por solidificação. “A normatização da tecnologia de estabilização por solidificação com critérios bem definidos poderia trazer benefícios sócio-ambientais [...] definindo critérios de avaliação e parâmetros do produto solidificado através de ensaios específicos” (BRITO e SOARES, 2004)
- Recomendamos que a contaminação do cimento Portland de alto forno, CP III, seja investigada mais detalhadamente.

Referências

REFERÊNCIAS:

ALBERS [et al]. **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X**. IN Revista Cerâmica 48. Janeiro/Fevereiro/Março, 2002.

AMODEO, W. **Origens sobre a sustentabilidade em arquitetura**. IN Seminário Meio Ambiente: O que será do amanhã? Organização Turguenev Roberto de Oliveira. São Paulo: Centro Universitário Belas Artes de São Paulo, 2008.

ANDRADE, A. C. F. **Tijolos de cinza volante e cal – estudo do desempenho quanto a resistência, absorção, durabilidade e aderência**. Dissertação (Mestrado). Curso de pós-graduação em engenharia civil. UFRGS. Porto Alegre, 1991.

ARAÚJO, E. P. [et al]. **Delimitação das bacias hidrográficas da Ilha do Maranhão a partir de dados SRTM**. Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, Brasil, 25-30 abril 2009. INPE, p. 4631-4638.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Básico sobre cimento: fabricação**. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/fabricacao/fabricacao>. Acesso em: 22 de junho de 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5735. **Cimento Portland de alto-forno**. 1991

_____. NBR 5751. **Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal**. 1992

_____. NBR 5752. **Materiais pozolânicos, determinação de atividade pozolânica com cimento Portland, índice de atividade pozolânica com cimento**. 1992

_____. NBR 6136. **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos**. 2007.

_____. NBR 7175. **Cal hidratada para argamassas – Requisitos**. 2003.

_____. NBR 7211. **Agregados para concreto – Especificação**. 2005

_____. NBR 7214. **Areia normal para ensaio de cimento**. 1982.

_____. NBR 7215. **Cimento Portland – determinação de resistência a compressão**. 1996.

_____. NBR 7251. **Agregado em estado solto, determinação de massa unitária**. 1982

_____. NBR 8491. **Tijolo maciço de solo-cimento – Especificação.** 1984.

_____. NBR 8492. **Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água - Método de ensaio.** 1984.

_____. NBR 10004. **Resíduos sólidos – classificação.** 2004.

_____. NBR 10005. **Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** 2004.

_____. NBR 10006. **Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** 2004.

_____. NBR 10007. **Amostragem de resíduos sólidos.** 2004.

_____. NBR 12653. **Materiais Pozolânicos.** 1992.

_____. NBR MB 3432. **Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75µm (nº 200).** 1991.

_____. NBR NM 18. **Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** 2004.

_____. NBR NM 23. **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** 2000.

_____. NBR NM 76. **Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine).** 1998.

ASTM C577. **Standard Test Method for Permeability of Refractories.** West Conshocken, PA., 1996.

BABU, K. G.; RAO, G. S. N. *Efficiency of Fly Ash in Concrete.* IN: **Cement & Concrete Composites**, n. 15, 223-229. England, 1994.

BAUER, L. A. F., BAUER, J. R. F. **A carbonatação do concreto e sua durabilidade.** In: **Materiais de Construção.** [Org.] L. A. Falcão Bauer. Vol. 2. 5ª Ed. Rio de Janeiro, 1994.

BIANCOVILLI, P. **Benefícios e danos dos metais pesados.** IN *Ciência e Vida.* Revista eletrônica. Ed. 65. 2006. Acesso em 2 de junho de 2010. Disponível em : http://www.olharvital.ufri.br/2006/index.php?id_edicao=065&codigo=2

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2010: Ano base 2009.** Rio de Janeiro: EPE, 2010. 276 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Relatório Técnico 31 – Perfil de areia para construção civil**. Brasília, 2009.

BRASIL. República Federativa do Brasil. LEI Nº 12.305, de 02 de agosto DE 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2010.

BRITO, A. L. F.; SOARES, S. R. **Normas e critérios para avaliação da tecnologia de Estabilização por Solidificação: situação brasileira**. IN: Anais do VII Seminário Nacional de São Paulo. São Paulo, 2004.

CASANOVA, F. (Coord.) **A utilização de rejeitos agroindustriais, industriais e minerais na estabilização de solos para construção de moradias de interesse social**. UFRJ. Rio de Janeiro. Habitare – Programa de Tecnologia de Habitação. Disponível em: http://www.habitare.org.br/prototipos_projeto4.aspx. Acesso em 25 de agosto de 2008.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. IN: **Cerâmica**, n. 55, p. 18-32, 2009.

CONAMA. O Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002. **Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais**. Brasília, 2002.

CORBIOLI, N. O futuro pode ser limpo. **Projeto Design**. Nº 277. 2003.

CARASEK, H. **Argamassas**. IN **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. Volume 2.

CALMON, J. L. **Resíduos Industriais e Agrícolas para a Construção Civil**. IN **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. Volume 2.

CONNER, J. R.; HOFFNER S. L. **The History of Stabilization/Solidification Technology**. IN *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 28(4): 325-396 (1998).

FORMIGA, M. M. M. [org.]. **Engenharia para o desenvolvimento: inovação, sustentabilidade, responsabilidade social como novos paradigmas**. Brasília: SENAI/DN, 2010.

HORNAIN, H.; MIERSMAN, F.; MARCHAND, J. **Influence of Residual Carbon in Fly Ash on Microstructure and Strength Development of Mortars and Concretes**. In: *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete: Proceedings Fourth International Conference*, Istanbul, Turkey, 1992.

INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C. **Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e de Forchheimer**. IN: *Revista Cerâmica*. Vol. 45 n. 292-293. São Paulo, 1999.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Pesquisa industrial mensal da produção física no Brasil**. Brasil, 2010.

_____. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão Brasil. Acesso em setembro de 2010.

JOHN, V. M. **Panorama sobre reciclagem de resíduos na construção civil**. IN: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. São Paulo, IBRACON, 1999.

JOHN, V. M. [et al]. **Cinzas e Aglomerantes Alternativos**. IN: Tecnologias e Materiais Alternativos de Construção. Wesley Jorge Freire, Antonio Ludovico Beraldo (coord.) – Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2003.

JOHN, V. M. **Materiais de Construção e o Meio Ambiente**. IN: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. Volume 1.

LIMA, S. A. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju**. Dissertação (Mestrado). Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. EESC – USP. São Carlos, 2008.

MALLMANN, J. E. C. **Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre, 1996.

MARQUES NETO, J. C. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Carlos: Rima, 2005.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MORITA, E. S. **Estudo experimental das emissões de NOx na combustão de carvão mineral brasileiro em leito fluidizado rápido**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica. Unicamp. Campinas, 2009.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução Salvador E. Giamusso. São Paulo: Pini, 1982.

NOGUEIRA J. R.; SICHIERI E. P. **Estudo do Potencial Pozolânico de Cinzas Volantes Residuais de Reatores de Leito Fluidizado**. IN: Anais do ENARC 2011: 2º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil. Maceió-AL, 2011a.

_____. **Matrizes de Cimento Portland: Classificação quanto ao Potencial de Contaminação**. IN: Anais do CBC 2011: 53º Congresso Brasileiro de Concreto. IBRACON, Florianópolis-SC, 2011b. No prelo.

OLIVEIRA, D. M. **Aplicação da Técnica de Solidificação/Estabilização para Resíduos Oleosos da Indústria Petrolífera, utilizando solo Argiloso e Bentonita**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

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

PABLOS, J. M. **Estudo para a reutilização do resíduo sólido constituído pelas areias de fundição aglomeradas com argila, através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland, para aplicação no setor da construção civil**. Tese (doutorado). Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. EESC – USP. São Carlos, 2008.

PEREIRA, V. M.; CARVALHO, E.; BARDELLA, P. S.; CAMARINI, G. **Análise fluido-dinâmica do escoamento em ensaio de permeabilidade ao ar de argamassas preparadas com cimento Portland de alto-forno**. IN: Revista Cerâmica. Vol. 54. n. 330. São Paulo, 2008.

PISANI, M. A. J. **Ciclo de vida das edificações: uma abordagem sustentável**. IN Seminário Meio Ambiente: O que será do amanhã? Organização Turguenev Roberto de Oliveira. São Paulo: Centro Universitário Belas Artes de São Paulo, 2008.

Portal de notícias imirante.com. **Apenas três municípios do Maranhão têm aterro sanitário**. Disponível em: <http://imirante.globo.com/noticias/2011/02/07/pagina266043.shtml>. Acesso em: 27 de julho de 2011.

RATTI, G. **Técnicas de Análise Química de Compostos Inorgânicos**. Artigo Eletrônico. 28p. Disponível em: http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_8_Analise_Quimica_PMI-2201.pdf. Acesso em 2 de junho de 2010.

SANTOS, C. **Prevenção à Poluição Industrial: Identificação de oportunidades, análise dos benefícios e barreiras**. Tese (Doutorado). Pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, 2005.

SERRADOR, M. E. **Sustentabilidade em arquitetura: referências para projeto**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. EESC – USP. São Carlos, 2008.

SEMA. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão. **Decreto nº 13.494 que Regulamenta o Código de Proteção do Meio Ambiente**. São Luís-MA, 2010.

SILVA, T. V. **Estudo comparativo de normas de lixiviação aplicadas a resíduos perigosos solidificados/estabilizados em cimento**. In XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México, 2002.

SICHERI, E. P (Coord.); PABLOS, J. M. (sup.); FERREIRA, O. P.; ROSSIGNOLO, J. A.; CARAN, R. **Materiais de construção I: aglomerantes minerais, agregados, argamassas, concretos e dosagem**. [Apostila]. São Carlos: Serviço gráfico: EESC-USP, 2008. 271p.

TAVARES, L. **Estudo sobre composição de fases e propriedades do FePO_4 processado em altas pressões**. Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação em Física. Instituto de Física. UFRGS. Porto Alegre, 2008.

TERMKHAJORNKIT, P.; NAWA, T.; KURUMISAWA, K. *Effect of water curing conditions on the hydration degree and compressive strengths of fly ash-cement paste*. IN: **Cement & Concrete Composites**, n. 28, 781-789, 2006.

VASKE N. R., CAMPAGNOLO J. L., DAL MOLIN D. C. C. Aplicação da Argamassa com adição de sílica ativa como material de reforço em elementos comprimidos de concreto. IN: **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 77-93, jul./set. 2008.

XIE, X. M.; GUO, L. **Study on Preparation and Properties of Fly Ash Concrete with High Sulfur and high-calcium fly**. Downloaded on July 06,2010 at 17:27:17. UTC from IEEE Xplore.

YANG, E. H.; YANG, Y.; LI, V. C. *Use of High Volumes of Fly Ash to Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness*. IN: **ACI Materials Journal**, n. 104, 303-311. November-December, 2007.

ZANTA, V. M. [et al]. **Resíduos Sólidos, Saúde, e Meio Ambiente: Impactos associados aos lixiviados de aterro sanitário**. IN Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração de tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Armando Borges de Castilho Junior (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, 2006.

Anexos

ANEXO A:

RELATÓRIO DE ENSAIO DE CIMENTO

**RELATÓRIO DE RESULTADOS DA ANÁLISE DE RISCO
ABSORÇÃO DE RISCOS / SAC
DO SISTEMA DE RISCO / RISCO**

	/ LECS	. 12. 21 71 102 021 71	152 021 71 112 021 71			SPM
	N#C	R	R	R	R	
%	C/	R	R	R	R	
	,	R	R	R	R	
	N#C	. 8	. 8	R	R	
%	C/	1 85	1 8	R	R	
	,	9	9	R	R	
	N#C	071 7	011 7	R	R	
Pá e n1: g6	C/	770	11	R	R	
	,	9	9	R	R	
	N#C	71 .	759	R	R	
O e R n6i R e	C/	9	71	R	R	
	,	9	9	R	R	
	N#C					
Lp- i, R k	C/					
	,					
	N#C	718	778	R	R	
ERsá R/ i	C/	1 8	1 8i	R	R	
	,	9	9	R	R	
	N#C	11 8	11 8	R	R	
ERsá R- i	C/	1 8 0	1 8 1	R	R	
	,	9	5	R	R	
	N#C	. 58	. 1 8	R	R	
ERsá R/ i	C/	78E	1 8	R	R	
	,	9	i	R	R	
	N#C	01 8	R	R	R	
ER9Rá R/ i	C/	18E	R	R	R	
	,	9	R	R	R	
	N#C	1E	101	R	R	
Ák R n6i R e	C/	7789	7. 8 1	R	R	
	,	9	9	R	R	
	/ 22	. 81	. 81	R	R	
M61		11 817	11 89	R	R	
E22		78 1	781	R	R	
Ta1S.		981E	981	R	R	
Án1S.		1815	181	R	R	
T, QaáRú Ká eoi	Fi S	E781	E78 E	R	R	
	N6S	18 5	. 815	R	R	
	MS.	18 1	181	R	R	
	FS1	181	18E	R	R	
	° 1S	1 8 1	1 81	R	R	
	/ 22E í tF	1 8 1	1 8 E	R	R	
	F. T R aox	. 897	. 8.	R	R	

Assessora Técnica

ANEXO B:

GRANULOMETRIA AGREGADO MIÚDO - JUNDU

Certificado de Análise

MINERAÇÃO
JUNDU

Data: 17.08.2010 10:02

Certificado Nº: 856892

Cliente: FIPAI - FUND P/ INCREMENTO PESQ APERF INDL

Lote: 60616H

Produto: Areia Quartzosa Industrial AQ - 120 SE

Nº Nota: 032916

Veículo: 0000 O MESMO

Placa: BNZ4743

Ensaio Granulométricos

Elemento	Abertura(µm)	Resultado	Acumulada	Unidade
# 18	1000	0.0	0.0	%
# 20	850	0.0	0.0	%
# 30	600	0.0	0.0	%
# 40	425	0.0	0.0	%
# 50	300	0.2	0.2	%
# 70	212	0.2	0.4	%
# 100	150	8.8	9.2	%
# 140	106	70.4	79.6	%
# 200	75	18.0	97.6	%
# 270	53	2.0	99.6	%
Fundo		0.4	100.0	%
Módulo AFS		107.1		AFS
Concentração		97.2		%
Finos		20.4		%

Outros Parâmetros

Elemento	Resultado	Unidade
Temperatura	26.0	°C

Parâmetros Químicos

Elemento	Resultado	Unidade
Argila AFS	0.060	%
Umidade	0.010	%
Teor de SiO ₂	> 99.000	%

Observação

Resultado *Aprovado*

Flavio Tavares Correa

Responsável

Este certificado é assinado eletronicamente.

ANEXO C:

BOLETIM DE ANÁLISES CAL - VOTORANTIM

CIMENTO ITAÚ S/A - ITAÚ DE MINAS
CONTROLE DA QUALIDADE

BOLETIM DE ANÁLISES DA CAL

CHIII

abril-10

Certificada pela NBR ISO 9001:2000

ENSAIOS QUÍMICOS

ENSAIO	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO
SiO ₂	%	3,17	<10%
Al ₂ O ₃	%	0,37	-
Fe ₂ O ₃	%	0,41	-
CaO (tot)	%	54,68	-
MgO	%	13,46	-
SO ₃	%	0,26	-
perda ao fogo	%	25,74	-
Umidade	%	0,15	-
CO ₂	%	12,48	< 13%
P30 0,600mm	%	0,00	< 0,5%
P200 0,075mm	%	7,36	<15%
H ₂ O	%	13,27	-
CaO N/H	%	1,88	<=4
OXIDOS N/H	%	13,83	<15%
C+M (OT)	%	91,73	> 88%
			-
			-

ENSAIOS FÍSICOS

ENSAIO	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO
Retenção de água		90	>70%
Estabilidade (APRO)		APRO	Ausência de cavidade ou protuberância

Observações:

RESPONSÁVEL TÉCNICO

Matheus Viotto Bezerra
CRQ 04347946

CHEFE CONTROLE DE QUALIDADE

Ednaldo Cruz Gomes
CRQ 02200405

Atualizado em: 16/4/2010 15:15

ANEXO D:

ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA CINZA VOLANTE - CESPE

Laboratório CESP de Engenharia Civil
Referência	P-014.2010	Especificações NBR-12653 Classe C		
Amostra	---			
Carta Proposta	---			
Data da coleta	11.06.2010	min.	máx.	
Superf. espec. Blaine (cm ² /g)	5650	---	---	
Densidade absoluta (g/cm ³)	2,30	---	---	
Análise Química (%)	Umidade	2,04	---	---
	Perda ao fogo	30,11	---	6,0
<p>Análise físico-química de cinza volante</p> <p>USP - São Carlos</p> <p>Josiane Nogueira</p>				

ANEXO E:

DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X

Difração de raios-x: Matriz 1:3 (25% de cinza como parte do aglomerante)

Difração de raios-x: Matriz 1:3 (50% de cinza como parte do aglomerante)

Difração de raios-x: Matriz 1:3 (75% de cinza como parte do aglomerante)