

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil**

**TESE DE DOUTORADO**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DISPOSIÇÃO FINAL E**  
**APROVEITAMENTO DA CINZA DE LODO DE ESTAÇÕES DE**  
**TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS COMO ADIÇÃO AO**  
**CONCRETO**

**André Luiz Bortolacci Geyer**

**ORIENTADORES: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Denise Carpena Coitinho Dal Molin**  
**Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli**

**Porto Alegre**

**2001**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**ESCOLA DE ENGENHARIA**

**Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DISPOSIÇÃO FINAL E  
APROVEITAMENTO DA CINZA DE LODO DE ESTAÇÕES DE  
TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS COMO ADIÇÃO AO  
CONCRETO**

**André Luiz Bortolacci Geyer**

**Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.**

**ORIENTADORES: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Denise Carpena CoitinhoDal Molin  
Prof. Dr.Nilo Cesar Consoli**

**Porto Alegre**

**2001**

**Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de  
DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada pelos orientadores e pelo  
Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul.**

-----  
**Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. pela Universidade de São Paulo  
Orientador**

-----  
**Prof. Nilo César Consoli  
Ph. D. Pela Concórdia University/ Canadá  
Orientador**

**Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**BANCA EXAMINADORA**

**Vladimir Antônio Paulon  
DR. Pela Universidade de São Paulo**

**Paulo J. Melagrano Monteiro  
Dr. Pela University of California at Berkeley, EUA**

**Ivo André Scheneider  
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

**Dr-Ing. Antônio Cezar Faria Vilela  
Dr. Pela Universidade Técnica de Aachen, Alemanha**

**Dedico esta Tese aos meus pais  
e a Rejane**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos Professores Dr. Nilo Cesar Consoli e Dra Denise Dal Molin pela valiosa orientação recebida, ensinamentos e apoio dispensado, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgotos, em especial, nas pessoas dos Engenheiros Jovenil dos Santos e Sônia Alves, pelo apoio recebido desde o início desta pesquisa, inclusive no fornecimento das amostras de Lodo.

Ao Dr. Dieter Wartchow, ex- Diretor Geral do DMAE e Presidente da CORSAN pelo apoio e incentivo para a realização da pesquisa.

Ao Professor Dr. Miguel Aloísio Satler pela carta de recomendação apresentada para meu ingresso no curso de doutorado.

Ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Goiás, nas pessoas do seu coordenador Professor Dr. Enio Pazini Figueiredo, do Eng. Deusair Rodrigues dos Santos e dos técnicos Manoel e Agnaldo, que tornaram possível a realização da parte experimental desta pesquisa.

Ao Centro Tecnológico de Engenharia Civil de FURNAS Centrais Elétricas S.A., em especial, aos Engenheiros Nicole Hasparyk, Flávio Mamed e Márcia Campos dos Santos, onde foi possível a realização dos ensaios químicos, de difração de raios X e de microscopia eletrônica de varredura.

Ao Laboratório de Geociências e de Análises Químicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela realização dos ensaios de difração de raios X e lixiviação/solubilização.

Aos colegas Andrea Shuler e Fernando Recena, que trabalharam juntos nos ensaios preliminares desta pesquisa.

A M.Sc. Eng<sup>a</sup>. Águida Gomes de Abreu, pela amizade, ensinamentos e fundamental ajuda no desenvolvimento da parte estatística desta tese.

A JICA, que ao proporcionar-me a realização de dois cursos no Japão, possibilitou-me conhecer o problema abordado nesta Tese.

Aos colegas da Universidade Federal de Goiás, em especial nas pessoas do ex-Diretor da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás Professor Osvaldo Luiz Valinote e do Diretor Professor Wanderlin José dos Santos, pelo grande apoio e grande amizade demonstrados.

A Universidade de Passo Fundo, em especial nas pessoas do Professor Luis Fernando Prestes, ex- Diretor da Faculdade de Engenharia, pelo apoio dispensado durante a realização do curso e ao Professor Dr. Ivo André Scheneider pelos ensinamentos e colaboração na realização da revisão bibliográfica e ensaios de Solubilização.

A Companhia de Cimento Goiás S/A, na pessoa do Eng. José Antônio, pelo fornecimento dos materiais e análises realizadas em seus laboratórios.

Ao CNPq pela bolsa de estudos oferecida na parte inicial desta pesquisa.

A todos que, de alguma forma, colaboraram na elaboração deste trabalho, meu reconhecimento.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE FOTOS	XV
LISTA DE TABELAS	XVII
RESUMO	XXI
ABSTRACT	XXII
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA	08
1.2 OBJETIVOS	10
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	11
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE	11
<b>2 SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO</b>	<b>13</b>
2.1. COLETA DE ESGOTOS	14
2.2. TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS	15
2.3 TRATAMENTO DA FASE LÍQUIDA	16
2.3.1. Lagoas de Estabilização	16
2.3.2 Lodos ativados	19
2.4 TRATAMENTO DA FASE SÓLIDA	22
2.4.1 Classificação dos Lodos	23
2.4.1.1 Classificação quanto à formação	24
2.4.1.2 Classificação quanto ao teor de umidade	24
2.4.2 Tipos de Processamento de Lodos	27
2.4.2.1 Adensamento	28

2.4.2.2 Digestão	29
2.4.2.3 Desidratação	30
2.4.2.3.1 .Lagoa de Lodo	31
2.4.2.3.2 Leitões de secagem	31
2.4.2.3.3 Centrifugação	32
2.4.2.3.4. Filtros Prensa de Placas e quadros	32
2.4.2.3.5 Filtros Prensa de Cinta	33
2.4.2.3.6 Filtros Vácuo	33
2.4.2.4 Incineração	34
2.4.2.4.1 Tipos de Incineração	35
2.4.5.2 Controle da emissão de gases na incineração	36
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE TRATAMENTO DE ESGOTOS	39
<b>3. CARACTERIZAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL DOS LODOS</b>	<b>41</b>
3.1.CARACTERIZAÇÃO DOS LODOS PROVENIENTES DE DIFERENTES PLANTAS DE TRATAMENTO	41
3.1.1 Caracterização Química	41
3.1.1.1 Caracterização química do Lodo úmido ou parcialmente seco	42
3.1.1.2 Caracterização química do Lodo incinerado	44
3.1.2 Caracterização Física	48
3.1.2.1 Caracterização Física do Lodo úmido ou parcialmente seco	48
3.1.2.1.1 Teor de umidade	48
3.1.2.2 Caracterização Física do Lodo Incinerado	49
3.1.3 Difratometria de raios X	50



3.1.4	Microscopia Eletrônica de Varredura.	52
3.1.5	Determinação da Superfície Específica	55
3.1.6	Classificação Geotécnica e Propriedades Índices	55
3.1.7	Discussão Sobre as Características dos Lodos	57
3.2	DISPOSIÇÃO FINAL DOS LODOS	59
3.2.1	Disposição no Solo	60
3.2.2	Disposição em Rios e no Mar	62
3.2.3	Disposição no Ar	63
3.2.4	Disposição final através do aproveitamento do resíduo	64
3.2.5	Discussão sobre as tendências de disposição final e utilização dos resíduos	64
<b>4.</b>	<b>UTILIZAÇÃO DOS LODOS COMO INSUMO</b>	
	<b>NA ENGENHARIA CIVIL</b>	<b>68</b>
4.1.	LODO COMO INSUMO NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS	72
4.1.1.	Confecção de tijolos com Lodo parcialmente desidratado	72
4.1.2.	Tijolos com Lodo incinerado	76
4.2.	AGREGADO LEVE PRODUZIDO COM LODO	78
4.2.1	Agregado graúdo leve	78
4.2.2	Agregado miúdo Leve	80
4.2.3	Considerações sobre a produção de agregados	81
4.3.	UTILIZAÇÃO DOS LODOS COMO ADIÇÃO MINERAL	
	NA PRODUÇÃO DE CIMENTOS E CONCRETOS	81
4.3.1.	A questão das adições ao concreto	81
4.3.1.1.	Adições pozolânicas e/ou cimentantes	84

4.3.1.2 Adição de finos ou fílers	88
4.3.2 A utilização da cinza de lodo em concretos	93
4.3.2.1 Concreto executado com adição de cinza de Lodo	94
4.3.2.2 Discussão sobre os Concretos executados com adição de cinza de Lodo	100
4.3.3 Cimento feito de cal e Lodo	100
4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DE LODO SANITÁRIO COMO INSUMO NA ENGENHARIA CIVIL	102
<b>5 PROGRAMA EXPERIMENTAL: CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DE LODO SANITÁRIO DA ETE IAPI</b>	<b>105</b>
5.1 INTRODUCAO	105
5.2 PROCEDÊNCIA E AMOSTRAGEM DO LODO SANITÁRIO	105
5.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	108
5.3.1 Análise dos resultados da caracterização química	110
5.4 GRANULOMETRIA, MASSA E ÁREA ESPECÍFICA DAS CINZAS DE LODO	113
5.4.1 Granulometria, massa específica e superfície específica da cinza incinerada	113
5.4.2 Granulometria e superfície específica da cinza incinerada e peneirada na peneira #200	114
5.4.3 Granulometria e superfície específica da cinza incinerada e moída por 24h em moinho de bolas	115
5.4.4 Análise dos resultados da granulometria, superfície específica e massa específica	116
5.5 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	118
5.5.1 Resultados obtidos	119

5.5.2	Análise dos resultados da difração de raio X	120
5.6	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	121
5.6.1	Resultados obtidos	122
5.6.2	Análise dos resultados da microscopia eletrônica	126
5.7	ENSAIO DE POZOLANICIDADE NAS CINZAS	
	OBTIDAS A 800°C	131
5.7.1	Resultados do ensaio de pozolanicidade	132
5.7.2	Análise dos resultados do ensaio de pozolanicidade	132
5.8	CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL DAS CINZAS	134
5.8.1	Solubilização da Cinza de Lodo Sanitário	135
5.8.2	Lixiviação da Cinza de Lodo Sanitário	137
5.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A CARACTERIZAÇÃO	138
<b>6</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL: ADIÇÃO DE CINZA</b>	
	<b>DE LODO SANITÁRIO AO CONCRETO</b>	<b>141</b>
6.1	PANEJAMENTO DOS ENSAIOS	142
6.1.1	Variáveis independentes	142
6.1.2	Variáveis Dependentes	143
6.2	PLANEJAMENTO DA AMOSTRA	148
6.3	MATERIAIS UTILIZADOS	152
6.3.1	Cimento	152
6.3.2	Agregados	153
6.3.3	Cinza de Lodo	155
6.4	PRODUÇÃO DE CONCRETO	156
6.5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	
	EM CONCRETO FRESCO	158
6.5.1	Abatimento de Tronco cone (Slump Test)	158

6.5.1.1. Resultados	158
6.5.1.2 Análise dos resultados de abatimento de tronco cone	158
<b>6.6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS</b>	
<b>EM CONCRETO ENDURECIDO</b>	<b>160</b>
6.6.1 Resistência à Compressão Simples	161
6.6.1.1 Análise dos resultados	162
6.6.2 Módulo de elasticidade	172
6.6.2.1 Análise dos resultados	172
6.6.3 Ensaio de Profundidade de carbonatação	177
6.6.3.1 Análise dos resultados	176
6.6.4. Ensaio de absorção de água	187
6.6.4.2 Análises dos resultados	188
<b>6.7. SOLUBILIZAÇÃO DE AMOSTRAS DE CONCRETO</b>	<b>191</b>
6.7.1 Análise dos resultados	192
<b>6.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS EXPERIMENTOS REALIZADOS</b>	<b>193</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>197</b>
7.1 CONCLUSÕES	197
7.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	199
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>201</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Esquema do tratamento convencional de Esgotos Sanitários (WAVRO, 1980 apud CRISTENSEN, 1987).	13
FIGURA 2.2 Esquema de funcionamento dos Sistemas de Tratamento de Esgotos sanitários por lagoas de estabilização (SPERLIN, 1999)	18
FIGURA 2.3 Esquema de funcionamento dos Sistemas de tratamento de esgotos domésticos por Lodos ativados (SPERLING, 1999).	21
FIGURA 3.1 Difratoograma de Raios X na Cinza do Lodo obtida 550 °C, proveniente da ETE IAPI (GEYER, RECENA & SCHULER ,1995)	51
FIGURA 3.2 Análise de tamanho de grãos da cinza	56
FIGURA 3.3 Curva de compactação para a cinza , densidade seca x conteúdo de umidade.	57
FIGURA 5.1 Curva granulométrica da Cinza de Lodo incinerado e destorroado	114
FIGURA 5.2 Curva granulométrica da cinza da Lodo peneirada na peneira #200	115
FIGURA 5.3 Curva granulométrica da cinza da Lodo moída em moinho de bolas por 24h	116
FIGURA 5.4 Difratometria de Raios X realizada na amostra de Cinza de Lodo Sanitário.	119
FIGURA 5.5 Gráfico com os compostos encontrados com a micranálise (EDS) no ponto 1 indicado nas Fotos 5.6 e 5.7	127
FIGURA 5.6 Gráfico com os compostos encontrados com a microanálise (EDS) no ponto 2 indicado nas Fotos 5.6 e 5.7	128
FIGURA 5.7 Gráfico com os compostos encontrados com a microanálise (EDS) no ponto 3 indicado nas Fotos 5.6 e 5.7	129
FIGURA 6.1 Influência isolada do teor de adição na resistência à compressão	165
FIGURA 6.2 Influência isolada da relação água/aglomerante na resistência à compressão.	166

FIGURA 6.3 - Influência isolada da idade na resistência à compressão.	168
FIGURA 6.4 – Influência do teor de adição para as diferentes relações água/aglomerante, na resistência à compressão simples.	168
FIGURA 6.5 – Influência da relação água/aglomerante para os diferentes teores de adição, na resistência à compressão simples.	169
FIGURA 6.6 - Influência isolada da relação água/aglomerante no Módulo de Elasticidade	174
FIGURA 6.7 Influência do teor de adição para as diferentes relações água/aglomerante no Módulo de elasticidade.	175
FIGURA 6.8 Influência da relação água/aglomerante para os diferentes teores de adição no Módulo de elasticidade.	175
FIGURA 6.9 – Influência isolada do teor de adição de cinza de Lodo na profundidade de carbonatação.	180
FIGURA 6.10 Influência isolada da relação água aglomerante ( $a/(a+ad)$ ) na profundidade de carbonatação	182
FIGURA 6.11 Influência isolada da idade na profundidade de carbonatação.	184
FIGURA 6.12 Influência dos teores de adição e das idades na profundidade de carbonatação	185
FIGURA 6.13 Influência da relação água/aglomerante e idade na profundidade de carbonatação.	185
FIGURA 6.14 Profundidade de carbonatação em função do teor de adição e da relação água/aglomerante	186
FIGURA 6.15 Variação dos valores medidos da absorção por imersão em função da relação $a/(c+ad)$ , para as adições de 0%, 10% e 20%.	189
FIGURA 6.16 Variação dos valores medidos da absorção capilar em função do teor de adição para as $a/(c+ad) = 0,50, 0,80$ e $1,10$	190

## LISTA DE FOTOS

FOTO 2.1 – ETE Lami em Porto Alegre	19
FOTO 2.2 - Lodo úmido após seu descarte	25
FOTO 2.3- Lodo parcialmente seco no leito de secagem.	26
FOTO 3.1 Microscopia eletrônica de varredura no Lodo incinerado a 550 C da ETE com ampliação de 500 vezes	52
FOTO 3.2 Microscopia eletrônica de varredura no Lodo incinerado a 550 C da ETE com ampliação de 1000 vezes	53
FOTO 3.3 – Microscopia eletrônica de varredura no Lodo incinerado a 550 C da ETE com ampliação de 3500 vezes	53
FOTO 3.4 Microscopia eletrônica de varredura no Lodo incinerado a 550 C da ETE com ampliação de 7500 vezes.	54
FOTO 5.1 Amostra da Cinza do Lodo da ETE IAPI	107
FOTO 5.2 Cinza de Lodo Sanitário da ETE IAPI destorroada	108
FOTO 5.3 – Microscopia eletrônica de varredura nas cinzas de Lodo incineradas à 800°C na ampliação de 500 vezes.	122
FOTO 5.4 – Microscopia eletrônica de varredura nas cinzas de Lodo incineradas à 800°C na ampliação de 1000 vezes.	123
FOTO 5.5 Microscopia eletrônica de varredura nas cinzas de Lodo incineradas à 800°C na ampliação de 3000 vezes.	123
FOTO 5.6 Microscopia eletrônica de varredura nas cinzas de Lodo incineradas à 800°C na ampliação de 10000 vezes	124
FOTO 5.7 Microscopia eletrônica de varredura nas cinzas de Lodo incineradas à 800°C na ampliação de 15000 vezes	124
FOTO 5.8 Orifícios nas partículas de maior dimensão preenchidos por	

materiais finos em ampliação de 1500x na microscopia eletrônica de varredura	125
FOTO 5.9 Orifícios nas partículas de maior dimensão preenchidos por	
materiais finos em ampliação de 12000x na microscopia eletrônica de varredura.	125



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 Porcentagem da população com sistema Esgotamento Sanitário (SEWERAGE DIVISION, 1998; BIO, 1997)	04
TABELA 2.1 - Padrões limites de emissão para incineração de resíduos (NILSSON, 1990)	37
TABELA 2.2. - Emissões decorrentes da queima de óleo diesel, carvão e resíduo urbano para a obtenção de 2000 kwh (NILSSON, 1990)	39
TABELA 3.1 Composição química e propriedades de Lodo úmido de esgotos (METCALF e EDDY, 1991)	42
TABELA 3.2 - Características químicas dos Lodos parcialmente secos ETES de Brasília e da ETE IAPI de Porto Alegre	43
TABELA 3.3 Teores de Metais pesados em Lodos de ETES (TILLER apud ANDREOLI, 1999 e MIYAZAWA, 1996)	44
TABELA 3.4. Composição do Lodo incinerado a 550 °C	45
TABELA 3.5 - Análise química semiquantitativa por espectrometria de raios X das cinzas de Lodos sanitários obtidas em incineração no Japão e na Alemanha a temperaturas de 800 °C (WIEBUSH et al., 1998)	47
TABELA 3.6 Resíduos obtidos na incineração a 550°C de Lodo 100% seco (GEYER, RECENA & SHULER, 1995)	49
TABELA 3.7 Análise química de típicos materiais pozolânicos, naturais e subprodutos (MEHTA, 1987; MEHTA, 1985; MALHOTRA, 1994 & McCARTHY et al, 1984).	58
TABELA 3.8 Evolução dos métodos de disposição final dos Lodos no Japão (KITA ENVIRONMENTAL COOPERATION CENTER, 1995)	65

TABELA 3.9 - Disposição final de Lodos na Europa. (WATER QUALITY INTERNATIONAL, 1992)	66
TABELA 3.10.- Disposição dos Lodos (WATER QUALITY INTERNATIONAL, 1992)	66
TABELA 4.1 Resultados do ensaio de Solubilização por 48h (COLLINS, 1977)	71
TABELA 4.2 - Análise do tijolo executado com Lodo seco (ALLEMAN & BERMAN 1984)	73
TABELA 4.3 Propriedades dos tijolos executados com Lodo in natura (TAY, 1987)	75
TABELA 4.4 - Propriedades dos tijolos executados com cinzas Lodo (TAY, 1987)	76
TABELA 4.5 – Avaliação de tijolos executados com adições de cinza de Lodo sanitário (TRAUNER, 1991).	77
TABELA 4.6 – Massa específica de agregados e resistência à compressão simples de argamassas (KATO & TAKESUE, 1984).	80
TABELA 4.7 - Classificação dos adições de acordo com as suas características (MEHTA & MONTEIRO, 1994)	85
TABELA 4.8 Características químicas do cimento de uma escória com característica pozolana e cimentante e um cinza volante (ALMEIDA, 1990 & PETRUCCI, 1978).	88
TABELA 4.9 – Composição dos cimentos Portland conforme as normas da ABNT	91
TABELA 4.10. – Dados dos materiais utilizados para estudos na Barragem Jordão (ANDRIOLO, 1998)	92
TABELA 4.11 - Trabalhabilidade e tempo de início em fim de pega (TAY, 1987)	95
TABELA 4.12. - Propriedades do concreto endurecido com adição de cinza de Lodo (TAY, 1987).	96
TABELA 4.13 - Resistência à compressão simples de concretos com	

a/(c+ad)= 0,3 e a/(c+ad) a/(c+ad) = 0,50 com parte do cimento substituído por cinza de Lodo.	98
TABELA 4.14 Abatimento de Tronco cone (Slump Test ) de concretos com a/(c+ad)= 0,3 e a/(c+ad) =0,50 com parte do cimento substituído por cinza de Lodo.	98
TABELA 4.15. Resultados de ensaios realizados por TADAO, MASSA-AKI & SHUNSOKU (1998)	99
TABELA 4.16 Análise química em percentual de massa(TAY & SHOW, 1991).	101
TABELA 5.1 Análise química semiquantitativa por espectrometria de raios X das cinzas de Lodos sanitários obtidas em incineração a temperatura de 800°C.	109
TABELA 5.2 Requisitos químicos para uso de cinzas como pozolanas em cimento Portland (MALHOTRA & MEHTA, 1996 & NBR 12653 (ABNT, 1992))	112
TABELA 5.3 Características quanto á granulometria de diferentes adições.	117
TABELA 5.4 Compostos encontrados na microanálise (EDS) realizada na microscopia eletrônica da cinza de Lodo	130
TABELA 5.5 Índice de atividade pozolânica	132
TABELA 5.6 Índice de atividade pozolânica mínimo para uso como adição a Cimento Portland.	133
TABELA 5.7 Resultados do Teste de Solubilização e os padrões da NBR 10006	136
TABELA 5.8 Resultados do Teste de Lixiviação e os padrões da NBR 10006	138
TABELA 6.1 - Fracionamento para os ensaios	150
TABELA 6.2 - Codificação realizada para as variáveis utilizadas nas análises estatísticas.	151
TABELA 6.3 Amostra utilizada para os ensaios	152
TABELA 6.4 Caracterização química, física e mecânica do cimento ARI utilizado na Tese.	153
TABELA 6.5 Composição granulométrica do agregado miúdo.	154
TABELA 6.6 Composição granulométrica do agregado graúdo.	155

TABELA 6.7 Especificações do concretos utilizados	157
TABELA 6.8 Ensaio de Abatimento de Tronco Cone (slump test) realizado conforme a NBR 7223 (ABNT,1992).	158
TABELA 6.9 Resistência à compressão simples de concretos aos 28 dias, em MPa.	161
TABELA 6.10 Resistência a compressão simples de concretos aos 91 dias, em MPa.	162
TABELA 6.11 Análise de regressão múltipla da resistência à compressão	162
TABELA 6.12. Análise da variância da regressão da resistência à compressão	163
TABELA 6.13 – Módulo de elasticidade de concretos aos 28 dias, em GPa.	172
TABELA 6.14 Análise de regressão múltipla do módulo de elasticidade	173
TABELA 6.15. Analise da variância da regressão do módulo de elasticidade	173
TABELA 6.16 - Profundidade carbonatada aos 91, 210 e 540 dias, em mm.	177
TABELA 6.17 Análise de regressão múltipla da profundidade de carbonatação	178
TABELA 6.18. Analise da variância da regressão da profundidade de carbonatação	178
TABELA 6.19 Absorção de água por imersão dos concretos	187
TABELA 6.20 Absorção de água por capilaridade dos concretos	188
TABELA 6.21– Análise físico-química da água proveniente de Solubilização	191

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DISPOSIÇÃO FINAL E  
APROVEITAMENTO DA CINZA DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO  
DE ESGOTOS SANITÁRIOS COMO ADIÇÃO AO CONCRETO**

**André Luiz Bortolacci Geyer**

**RESUMO**

Com a ampliação dos sistemas de tratamento de esgotos sanitários, que vem ocorrendo no Brasil, surge um problema para o qual ainda não existem soluções definitivas, a forma de disposição final segura dos Lodos Sanitários, que são os resíduos sólidos advindos deste processo. Nesta pesquisa estuda-se as possibilidades de aproveitamento destes resíduos, após serem submetidos à incineração, na indústria da construção, especificamente a sua utilização como adição ao concreto, substituindo parte do cimento Portland.

Os aspectos estudados compreendem duas fases experimentais: na primeira, realiza-se uma caracterização química, física, morfológica e ambiental do resíduo, onde constata-se que o material apresenta potencial para ser utilizado como adição ao concreto e que, quanto ao aspecto ambiental é classificado como um resíduo não inerte, no qual também encontra-se compostos patogênicos; na segunda fase, estuda-se as possibilidades de utilização deste resíduo em substituição parcial do cimento, na confecção de concreto, verificando-se os efeitos nas propriedades do concreto fresco e endurecido, bem como a capacidade que este material tem em reter de forma segura o resíduo não inerte. Os resultados mostram que a cinza de Lodo pode ser utilizada como adição ao concreto, com efeito predominante de fíler, em percentuais até 20%, em concretos com relação água/aglomerante entre 0,65 e 1,10. Com  $a/(c+ad) = 0,65$  e  $0,80$  se tem benefícios ambientais com a utilização desta adição, com  $a/(c+ad) = 0,95$  e  $1,10$  se tem benefícios econômicos, com a redução do consumo de cimento e técnicos, com a melhoria das propriedades mecânicas dos concretos. Conforme os resultados de solubilização, em amostras de concreto, esta matriz é capaz de reter de forma segura os compostos nocivos presentes no resíduo.

# **CONTRIBUTION ON THE STUDY OF FINAL DISPOSAL AND USE OF SLUDGE ASH FROM SEWAGE TREATMENT PLANTS AS AN ADDITION IN CONCRETE**

**André Luiz Bortolacci Geyer**

## **ABSTRACT**

The sewage treatment in Brazil has increased dramatically in the last decade. As a consequence, the sewage treatment systems create problems regarding the final disposal and use of these residues called sewage sludge. This research evaluates the possibility of use of incinerated material, such as ashes, in civil construction, especially the use of this material as a partial substitute of ordinary Portland Cement in concrete production.

An experimental research program was conducted to determine possibilities of uses of the incinerated sludge. Such studies were divided into two phases: in the first phase, studies on the chemical, physical, morphological and environmental characteristics of the ashes were carried out, where it was found that such residue is a non inert material composed by some pathogenic components, according to Brazilians standards; in the second phase mechanical, durability and environmental tests were carried out to analyse the potential use of the sludge ash in concrete, checking its effects on fresh and hard concrete. It was concluded that concrete can be a secure medium to dispose this residue and it can substitute a portion of the ordinary Portland cement, as a filler, up to 20%, in concrete with w/c (water/cement ratio) from 0,65 to 1,10.

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades humanas geram resíduos. Estes resíduos podem ser líquidos, gasosos ou sólidos. Durante muito tempo, como decorrência da pequena população existente na terra, bem como da incipiente organização social, os resíduos foram tratados normalmente pela natureza, e processados dentro do ciclo natural de transformação da matéria, que é resultante da capacidade que a natureza tem de se auto-depurar (ENGENHARIA SANITÁRIA, 1977).

Com o desenvolvimento social do homem e principalmente após a revolução industrial, a produção de resíduos cresceu vertiginosamente, tendo em vista inicialmente os equipamentos e as facilidades na sua disposição, pela procura de mais conforto e melhoria do padrão de vida da população. A produção de resíduos passou a ser, após era industrial, padrão de medição do estágio de desenvolvimento econômico, isto é, quanto mais resíduo se produzisse, mais elevado seria o padrão de vida de uma comunidade (SORG, 1970).

As conseqüências da produção ilimitada de resíduos foi a quebra do Ciclo de Transformação da Matéria, com o qual a natureza procedia a sua regeneração, surgindo o fenômeno da poluição nas suas diversas formas. Os resíduos sólidos e líquidos urbanos como lixo e resíduos de processos de tratamento de efluentes sanitários ou industriais passaram a ser, entre outros, agentes causadores da poluição nas grandes áreas urbanas.

De acordo com ANDREOLI (1999), a pressão de produção da sociedade moderna, principalmente após o início deste século, com o uso de poderosos meios de transformação da natureza, geraram evidentes desequilíbrios ambientais. O manejo inadequado de resíduos sólidos gerados nos processos produtivos ou atividades humanas, particularmente daqueles considerados perigosos, tem causado, no mundo todo, cada vez com mais freqüência, problemas significativos de Saúde Pública e danos ao meio ambiente.

Segundo SWAMY (2000), as mudanças sociais que vem ocorrendo sem controle, como conseqüência da revolução tecnológica, industrialização, crescimento populacional e cada vez maior urbanização do planeta tem resultado em um massivo consumo de materiais não renováveis e recursos energéticos. O autor afirma que a poluição inaceitável, e incontrolada, provoca danos muito grandes ao meio ambiente e lança neste enormes quantidades de resíduos poluentes.

A partir de 1972, com a Conferência de Estocolmo, em que se estabeleceu a Declaração dos Direitos do Meio Ambiente, é que a humanidade despertou sua consciência ecológica e que as atividades que agredissem o meio ambiente passaram a ser alvo de atenção especial (ABREU e CARNEIRO, 1994).

Desde a década de 80, várias experiências têm sido realizadas, em vários países, para descobrir alternativas técnicas para aproveitamento e disposição de resíduos. Para ANDREOLI (1999), todo o esforço tem como objetivo o desenvolvimento sustentável, cujos pilares foram definidos na década de 80, propondo que o desenvolvimento econômico atenda as necessidades humanas de uma forma justa, respeitando a integridade ecológica dos sistemas naturais, e que as alternativas técnicas de produção sejam economicamente viáveis.

Conforme MOURA (2000), a preocupação com o grave problema da geração de resíduos vem, cada vez mais, despertando na sociedade a conscientização da necessidade de realização de estudos com vistas a melhorar o ciclo de produção e adequar a destinação dos resíduos gerados.

A reciclagem de resíduos é um tema que tem ocupado papel de grande destaque nas pesquisas desenvolvidas nos últimos anos (GONÇALVES,2000; SWAMY,2000; AGOPYAN, 2000; entre outros).

Dentre os resíduos urbanos, um dos mais problemáticos é o gerado nos processos de tratamento de esgotos sanitários domésticos. O chamado Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários não se origina de processos produtivos industriais ou agrícolas, mas sim, se constitui de uma segunda fase do tratamento dos esgotos sanitários.

Denomina-se Lodo, Lodo Sanitário ou Lodo Orgânico o principal subproduto sólido do tratamento de esgotos sanitários, o qual pode conter qualquer produto que tenha sido



utilizado na área de drenagem da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) onde é gerado. Esta característica faz do Lodo um material de natureza complexa (BRUCE et al., 1990).

Nos meios urbanos, os Lodos Sanitários são gerados diariamente em grande volume, dependendo diretamente do percentual de esgotos que é tratado. Estima-se que podem chegar a uma quantidade na ordem de 1000 g / habitante/dia, de material parcialmente seco, o qual pode conter entre 70 e 90 % de água em sua composição. Quando totalmente desidratado, transforma-se, em média, em 150 g / habitante / dia (WALDEMAR, 1992; IMHOFF, 1986).

Nos Estados Unidos, a quantidade de resíduos de estações de tratamento de esgotos dobrou entre 1972 e 1990, devido principalmente aos crescentes investimentos em sistemas de tratamento de esgotos sanitários. Esta tendência também vem acontecendo nos países em desenvolvimento, à medida que grandes investimentos no saneamento básico vêm sendo feitos a partir dos anos 90 (SEWERAGE DIVISION, 1998).

O Brasil, apesar de ser a oitava economia do mundo, apresenta um quadro crítico quanto à realidade sanitária, típico de países subdesenvolvidos. De acordo com a SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO apud ANDREOLI (1999), em 1990, apenas 35% da população brasileira era servida por rede de coleta de esgotos, o que representava 75,5 milhões de pessoas sem acesso a estes serviços. Do esgoto coletado, menos de 10% recebia algum tratamento, o que implicava em que apenas 3,5% da população tivesse seus esgotos tratados.

Dados de 1996 mostram um grande crescimento no percentual de esgotos tratados no Brasil entre 1990 e 1996, passando de 3,5% para 11,31% (BIO, 1997). Este aumento demonstra que, embora os percentuais ainda sejam muito pequenos, tem ocorrido grandes investimentos nesta área, nos últimos anos.

Na TABELA 1.1 apresentam-se as porcentagens de população conectadas aos sistemas de esgotamento sanitário com tratamento em alguns países desenvolvidos, e no Brasil.

TABELA 1.1 Porcentagem da população com sistema de Esgotamento Sanitário (SEWERAGE DIVISION, 1998; BIO, 1997)

País /ano	% da população com esgotos sanitários coletados e tratados
Reino Unido / 1993	96%
Alemanha / 1993	90%
França / 1987	78%
Canadá / 1993	75%
EUA / 1992	71%
Itália / 1987	61%
Japão / 1997	55%
Brasil/1991 (*)	11%

\* 35% dos esgotos no Brasil são somente coletados

A disposição final dos resíduos sólidos do tratamento dos esgotos sanitários domésticos tem se tornando um grave problema ambiental, porque se por um lado promove-se o saneamento básico e a saúde pública com o tratamento dos esgotos, por outro gera-se nos processos compostos indesejáveis devido à alta carga poluidora e patogênica que carregam.

No caso de países em desenvolvimento, onde são escassos os recursos para a coleta e tratamento de esgotos, os sistemas são em grande parte mistos, isto é, coleta-se numa mesma rede os esgotos cloacais domésticos e os pluviais.

Nos Lodos gerados em sistemas mistos ou unitários a carga poluente constitui-se da matéria orgânica e patogênica dos esgotos cloacais adicionada da carga patogênica existente nos esgotos pluviais, o que torna estes resíduos mais difíceis ainda de serem depositados.

Estabelece-se, portanto, um problema: onde e como dispor o Lodo Sanitário de uma forma segura, tendo em vista que principalmente nos grandes centros urbanos não existem áreas para este fim ?

Este problema, na realidade, não é novo. Na primeira década deste século, já se mencionava os Lodos gerados no tratamento de esgotos como algo de difícil disposição (THOMPSON, 1909).

Conforme LUDUVICE et al. (1992), nos chamados países desenvolvidos a disposição final segura de Lodos é um dos principais problemas enfrentados pelos órgãos de controle ambiental e empresas de saneamento.

Até a década de 60, a única forma de disposição era em aterros sanitários, baseando-se no funcionamento do Ciclo Natural de Depuração da Matéria. Porém, com o crescimento das cidades e conseqüente aumento da quantidade deste resíduo, esta alternativa passou a ser ineficaz sob os pontos de vista físico e ambiental (AZUMA, 1973).

No caso dos resíduos de Estações de tratamento de esgotos, os precursores em pesquisar o aproveitamento destes materiais tem sido os países industrializados, destacando-se o Japão , E.U.A e Singapura, onde têm-se estudado diferentes alternativas para o aproveitamento dos Lodos (JAPAN SEWAGE WORKS AGENCY, 1990).

Estudos feitos recentemente têm mostrado limitações para o uso na agricultura decorrentes da presença no Lodo de bactérias, metais pesados e outros contaminantes. Cada vez mais esta disposição final do resíduo tem sido colocada em questão porque se mantêm presentes riscos de contaminação direta do solo, de águas subterrâneas, da vegetação e mesmo a contaminação do homem por contato direto ou através dos alimentos vegetais (SATO et al., 1996).

Conforme TAMKI (1995), desde a 11<sup>o</sup> Conferência Americano-Japonesa sobre Tecnologia de Tratamento de Esgotos Sanitários, passou a existir uma consciência de que o caminho para a disposição final dos Lodos é a reciclagem e aplicação do material como insumo na fabricação de algum produto.

Além da agricultura, duas outras linhas básicas vêm se destacando no sentido da disposição final e também do aproveitamento deste resíduo. Após a agricultura passou-se a pesquisar as possibilidades de utilização na produção de energia e na construção civil. O chamado “ACE Plan“ Japonês foi que primeiro estabeleceu as diretrizes das atuais pesquisas para a disposição final do Lodo, dentro de três áreas básicas: agricultura (A), construção (C) e produção de energia (E) (JAPAN SEWAGE WORKS AGENCY, 1990).

No caso da agricultura, as pesquisas mais recentes apontam que os Lodos podem continuar a ser utilizados como fertilizantes do solo, porém somente em áreas controladas,

nas quais sejam cultivadas, por exemplo, vegetações ornamentais. Além disto, são pré-requisitos que sejam feitos estudos que garantam a permanência, em caráter definitivo, do resíduo no local depositado e que não existam riscos da contaminação do subsolo (LUDUVICE, 1995).

Conforme AGOPYAN (2000), exemplos de utilização de resíduos de tratamento de esgotos, como adubo orgânico, em plantações de cana de açúcar, com a finalidade de produção de álcool combustível, tem apresentados resultados positivos no Estado de São Paulo.

A produção de energia através da utilização do resíduo, como combustível, também tem sido pesquisada para usos junto aos centros de reciclagem de Lodo, onde o material seco pode ser utilizado como combustível de fornos. Esta alternativa, todavia, tem apresentado algumas limitações devido ao baixo poder calorífico que o Lodo apresenta (ACE PLAN, 1990).

SAUTEREY (1978) aponta a Engenharia Civil como o ramo de atividade tecnológica que, pelo volume de recursos naturais consumidos, parece ser o mais indicado para absorver resíduos .

Dentre outras áreas de produção, a construção civil tem ocupado lugar de destaque no aproveitamento de diferentes resíduos de diversas fontes, como por exemplo as escórias siderúrgicas e as cinzas de termoeletricas (SWAMY et al. ,1986, MALHOTRA et al., 1987, MALHOTRA e MEHTA, 1996, entre outros), a sílica residual da produção de ferrosilício (sílica ativa) (MALHOTRA e MEHTA, 1996 e DAL MOLIN, 1995), as cinzas de casca de arroz (COUTINHO et al., 2000; DAL MOLIN et al., 1996; AL-KHALAF e YOUSIFT, 1984 e COOK, 1986, entre outros); os resíduos da produção de solados plásticos de calçados (GARLET, 1997), as fibras de sisal e de coco (AGOPYAN, SAVASTANO e JOHN 2000 entre outros). Estes materiais têm sido particularmente aproveitados como insumo para a fabricação de materiais de construção.

No caso do aproveitamento do Lodo Sanitário na construção civil, alguns estudos têm sido realizados quanto ao seu uso na produção de blocos cerâmicos (ALLEMAN e BERMAN, 1984; TAY, 1987, TRAUNER, 1991 e WIEBUSCH e SEYFRIED, 1997), concretos asfálticos (ACE PLAN, 1990) e concretos com cimento Portland (TAY, 1986;

TAY, 1987; KATO e TAKESUE, 1994; AGOPYAN e MORALES, 1992; TAY e SHOW, 1991 e TAY e SHOW, 1993), porém as questões ambientais, no sentido de estabilização definitiva do resíduo, bem como o desempenho, quanto a durabilidade ao longo do tempo destes materiais, a partir do uso destes subprodutos não têm sido investigados com profundidade.

O concreto têm sido escolhido para receber vários destes resíduos, por ser um material no qual já são tradicionalmente adicionados resíduos como a escória de alto-forno, a cinza volante, a sílica ativa, pós de calcário, entre outros (SWAMY et al., 1986, MALHOTRA et al., 1987, CINCOTTO, 1989; CINCOTTO, 1990; MALHOTRA e MEHTA, 1996, ANDRILOLO, 1998, entre outros).

Conforme AGOPYAN (2000), dentro da Indústria da Construção, a produção de cimento e de concreto, devido aos elevados volumes, tem sido um grande consumidor de resíduos, cumprindo o papel de neutralizar materiais que, se ficassem na natureza, seriam nocivos.

A utilização do Lodo diretamente, após o tratamento de esgotos, em algum processo de produção de material de construção, por exemplo, esbarra na constituição deste resíduo, que é basicamente formada por matéria orgânica e água.

Porém tem se associado a tendência desta utilização o fato de que cada vez mais os Lodos vem sendo incinerados, após serem gerados, como forma de reduzir seus volumes e gerar energia. O resíduo a ser disposto passa a ser não mais o Lodo orgânico, mas sim as cinzas obtidas nos processos de incineração.

Neste trabalho busca-se focar o aproveitamento, na Indústria da Construção, dos Lodos gerados na cidade de Porto Alegre, que tem sido uma das alternativas propostas para a disposição final destes resíduos, principalmente devido ao grande potencial que esta indústria possui no aproveitamento de subprodutos.

Aborda-se aqui, especificamente, uma das possibilidades de aproveitamento das Cinzas de Lodo Sanitário na Indústria da Construção Civil: como insumo na produção de concretos.

Busca-se analisar os seguintes aspectos: o concreto como local de disposição final segura das cinzas de Lodo e os efeitos que a adição de diferentes percentuais de cinzas podem causar no desempenho deste material.

## 1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Conforme CHRISTENSEN (1987), em sistemas de tratamento secundário estima-se que a quantidade de Lodo Sanitário úmido gerada seja de 2% do total de esgoto bruto. Considerando-se que a quantidade de esgotos por habitante gerada diariamente é de 400 kg, teria-se cerca de 8 kg de Lodo úmido por pessoa/dia.

O Lodo úmido contém em torno de 98,5 % de água na sua composição em massa, portanto a quantidade de Lodo 100% seco pode chegar, em massa, a 1,5 % do Lodo úmido. Quando é utilizado o processo de incineração do Lodo, 100% seco, obtêm-se de cinza aproximadamente, em massa, 33 % do material seco (GEYER, RECENA, e SCHULER,1995).

Por exemplo, para estas condições, uma população de 1 milhão de pessoas geraria um fluxo de esgoto de 400.000 t/dia, uma quantidade de Lodo úmido de 8000 t/dia e uma quantidade de Lodo seco de 120 t. Com a incineração da matéria seca, geraria-se uma quantidade de cinzas de aproximadamente 40 t.

Estas quantidades podem apresentar variações dependendo dos processos de tratamento e desidratação utilizados, bem como das características e da forma da coleta do esgoto. A média de geração de lodo seco por habitante encontra-se entre 100g e 150g ao dia (ANDREOLI, 1999, WQI, 1994, CHRISTENSEN, 1987, entre outros).

Dados do WQI (1994) mostram que na cidade de Tóquio, no Japão, onde a população fixa é estimada em 8 milhões de habitantes, podendo durante o dia chegar a 11 milhões, são produzidos diariamente 5 milhões de m<sup>3</sup> de esgotos sanitários por dia, gerando uma quantidade de Lodo úmido de 130 000 t dia.

Na cidade de Porto Alegre, até 1994, eram coletados 74 % dos esgotos sanitários, sendo 47 % em redes tipo separador absoluto e 37 % através da rede de drenagem pluvial em sistema misto de coleta (DMAE, 1995). A quantidade de esgoto sanitário tratado, até 1994, era de 10% do total coletado, ou seja, somente cerca de 7,4 % dos esgotos gerados

pela população da cidade eram tratados. O restante dos esgotos coletados e não tratados eram conduzidos através de estações de bombeamento para o Rio Guaíba sem nenhum tratamento, ou seja, levando-se ao corpo receptor uma elevada carga poluidora (DMAE, 1995).

A Prefeitura Municipal de Porto Alegre, através de um convênio com o Banco Interamericano de Desenvolvimento, estabeleceu a realização de grandes investimento para implantação de sistemas de tratamento de esgotos sanitários na cidade até o ano 2003. Dentro do Programa Pró-Guaíba, assinado neste convênio, o percentual de esgotos sanitários tratados deveria ser elevado para 25% em 1998, 50 % em 1999 e cerca de 90 % em 2003 (PRÓ-GUAÍBA, 1994).

Anteriormente ao Programa Pró-Guaíba existiam em operação na cidade 8 pequenas estações de tratamento de esgotos responsáveis pelo baixo percentual de esgoto tratado. Estas estações geravam cerca de 11,35 t/dia de Lodos, considerando estes parcialmente desidratados (PRÓ-GUAÍBA, 1994).

Com as obras que vem sendo executadas dentro do Pró-Guaíba, desde 1999, 83,74% dos esgotos sanitários já são coletados na cidade de Porto Alegre, sendo 52,84 % em sistema separador absoluto e 30,9 % em sistema misto.

A construção de novas estações de tratamento, que aumentou de 8 para 10 o número de ETES, já permitiu que o percentual de esgotos tratados com tratamento secundário fosse aumentado de 8 % para 15%. Nestes percentuais não estão incluídos os tratamentos primários, realizados através de fossas sépticas, que estima-se atingirem cerca de 30,9% da população da cidade.

Atualmente estão em construção duas grandes estações de tratamento: a ETE Navegantes e a ETE Belém, que com suas conclusões, aumentarão o percentual de esgotos com tratamento secundário para 25%. Prevê-se para 2003, com a construção da ETE Ponta da Cadeia, um incremento de 33% nos esgoto tratados com tratamento secundário.

Estimativas do DMAE prevêem, portanto, para 2003, que 58% dos esgotos da cidade sejam tratados com tratamento secundário o que, somando com o que hoje é tratado de forma primária, elevaria o total de esgotos tratados para 88,9%. Este valor está nos níveis de países desenvolvidos (SEWERAGE SYSTEMS, 1998).

Considerando que a população da cidade de Porto Alegre é de aproximadamente 1,3 milhões de habitantes, que 25% desta já possui tratamento de esgotos secundário, as quantidades de lodo gerado são: 2600 t/dia de Lodo úmido e 49 t/dia de Lodo seco e em caso de incineração do material seco, restariam aproximadamente 13t/dia de cinza de Lodo. Para o ano de 2003 as quantidades serão aumentadas em 2,3 vezes.

O grande volume de Lodos que está sendo gerado através da ampliação dos sistemas de esgotamento sanitário, a indisponibilidade de locais para disposição destes resíduos na região metropolitana e a falta de tecnologias para aproveitamento destes, justifica a necessidade de que sejam estudadas com urgência alternativas seguras para a disposição dos Lodos da cidade de Porto Alegre.

## **1.2 OBJETIVOS**

A presente pesquisa tem como objetivo principal contribuir para os estudos de alternativas de disposição final segura dos Lodos de ETES (Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários) gerados na cidade de Porto Alegre, verificando a possibilidade de utilização destes resíduos, após o processo de incineração, como adição ao concreto.

Como objetivos, secundários, tem-se:

- levantar as alternativas hoje existentes para disposição final dos Lodos sanitários;
- levantar as alternativas de aproveitamento dos Lodos Sanitários como insumo na Indústria da construção civil, a partir de experiências anteriores realizadas no exterior e no Brasil;
- caracterizar a cinza de Lodo sanitário da ETE IAPI/POA ( análise química, física, morfológica, microestrutural e de impacto ambiental);
- analisar o desempenho de concretos com diferentes teores de adições de cinza de Lodo da ETE IAPI e diversas relações água/ aglomerante, quanto a propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade) e quanto à durabilidade (avaliado através de ensaios de carbonatação e de absorção de água);



- avaliação ambiental quanto ao uso do resíduo no concreto, ou seja, verificar se o concreto é capaz de reter de forma segura a cinza de Lodo.

### **1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA**

A realização deste estudo encontrou algumas limitações, a seguir descritas:

- a escolha desta planta de tratamento, ETE IAPI, como único local de coleta do Lodo, ocorreu devido a ser a única que estava em plena atividade e com sistema de tratamento similar à maioria dos que serão adotados em Porto Alegre;
- a amostra de Lodo coletado foi 1000 kg, parcialmente desidratado, a qual foi dimensionada de forma a que fosse possível se incinerar o material e que a quantidade de cinzas geradas atendessem aos ensaios planejados para a pesquisa;
- como ainda nenhum incinerador havia sido instalado nas ETES de Porto Alegre, utilizou-se para esta pesquisa os incineradores da INFRAERO, no Aeroporto Internacional Salgado Filho, a qual autorizou somente a incineração em uma só data desta quantidade de Lodo;
- a temperatura de incineração, de 800°C, foi definida por ser esta a que será utilizada nos incineradores municipais, obtendo-se então cinzas na mesma forma como serão, futuramente, geradas nas plantas de tratamento de Porto Alegre que optaram por esta tecnologia .
- o tempo de queima foi determinado automaticamente pelos equipamentos em função da quantidade de material a ser incinerado.

### **1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE**

Além deste Capítulo introdutório, a Tese está organizada em mais seis capítulos.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre os Sistemas de Esgotamentos Sanitários e dos resíduos produzidos, enfocando a parte sólida destes resíduos, ou seja, os Lodos Sanitários.

No Capítulo 3 são apresentadas caracterizações químicas, físicas e morfológicas de Lodos Sanitários gerados em algumas importantes plantas de tratamento de esgotos, destacando-se os estudos preliminares a esta tese sobre os resíduos gerados na cidade de Porto Alegre, bem como são descritas as alternativas hoje existentes para a disposição final do resíduo.

No Capítulo 4 são discutidas as possibilidades de aproveitamento do Lodo como insumo na Indústria da Construção Civil, a partir de experiências anteriores realizadas no exterior e no Brasil.

No Capítulo 5, o Lodo da ETE IAPI (Estação de Tratamento de Esgotos do Bairro IAPI), a qual gera o resíduo com as características dos que serão gerados na maioria das ETES da cidade, é caracterizado química, física, morfológica e ambientalmente, além de iniciar-se os estudos sobre as potencialidades de uso das cinzas deste Lodo como adição mineral ao concreto.

No Capítulo 6 é apresentado o programa experimental proposto nesta Tese, que consiste da verificação das possibilidades de utilização das Cinzas do Lodo Sanitário como adição, em diferentes teores, em diferentes tipos de concretos, e suas implicações ambientais quanto à verificação da estabilização deste resíduo nesta aplicação. Este Capítulo foi dividido em duas etapas:

- Na primeira etapa realizam-se experimentos com a adição de diferentes percentuais de cinzas de Lodo a diferentes concretos, nos quais variou-se a relação  $a/(c+ad)$  (água/aglomerantes), avaliando-se propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos confeccionados;
- A última etapa se constitui da avaliação da capacidade do concreto em solidificar, estabilizar ou encapsular de forma segura os materiais nocivos presentes no resíduo, utilizando-se para isto ensaios de Solubilização dos concretos executados.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e considerações finais do trabalho.

## 2 SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

O Sistema de Esgotamento Sanitário compreende três fases distintas e interligadas: a coleta dos esgotos, o tratamento dos esgotos e a disposição final do efluente líquido e do resíduo sólido (Lodo).

A FIGURA 2.1 mostra esquematicamente as etapas do sistema.

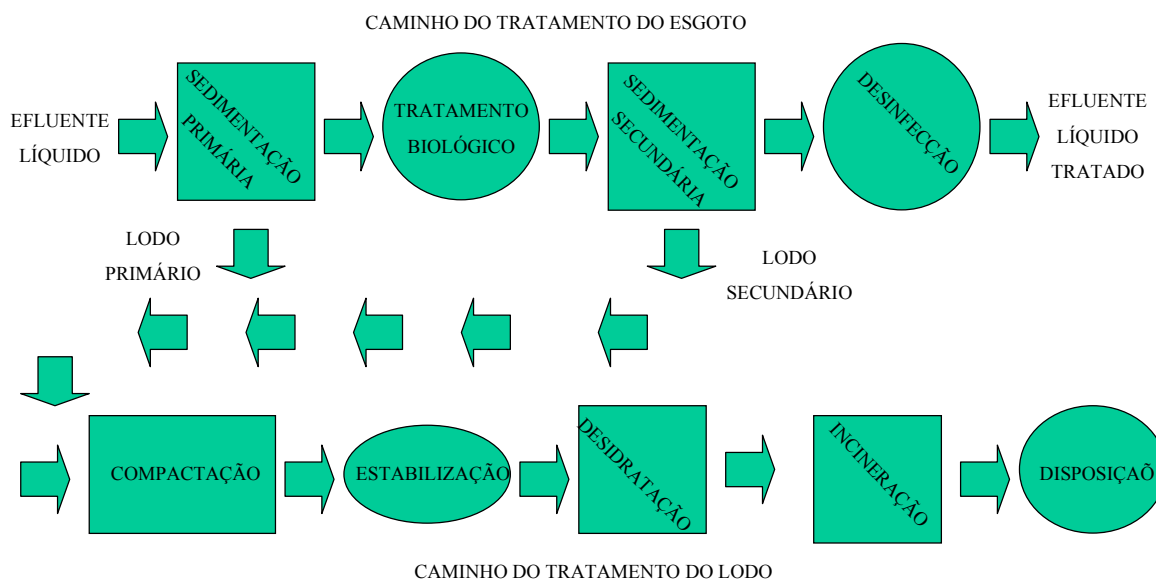


FIGURA 2.1 Esquema do tratamento convencional de Esgotos Sanitários (WAVRO apud CRISTENSEN, 1987).

## 2.1 COLETA DE ESGOTOS

A coleta de esgotos sanitários é realizada através de redes, que constituem-se de tubulações de coleta (canalizações) instaladas junto às vias públicas ou de canais a céu aberto, nos quais são lançados os esgotos domésticos de cada habitação. A rede coleta e transporta os esgotos domésticos por gravidade ou por sistemas de bombeamento, levando estes até as ETES (Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários)

A nomenclatura das redes pode apresentar variantes, ou seja, denominar-se redes as que possuem pequeno diâmetro e estão instaladas junto às edificações, coletores àqueles que recebem os esgotos das redes de uma determinada área, interceptores que são redes de grande diâmetro que coletam os esgotos de um bairro ou bacia hidrográfica, transportando estes, por gravidade, e emissários que diferenciam-se dos anteriores por transportarem os esgotos por bombeamento.

Quanto ao tipo de esgotos que coletam existem basicamente dois: a coleta em sistema separador absoluto e a em sistema unitário ou misto.

O sistema separador absoluto consiste no conjunto de redes, coletores, interceptores e emissários que coletam e transportam única e exclusivamente os esgotos sanitários domésticos.

O sistema misto ou unitário consiste de redes que coletam conjuntamente os esgotos sanitários domésticos e os esgotos pluviais.

A adoção de um ou outro sistema de coleta depende das características da bacia hidrográfica, do tipo de tratamento de esgotos e, principalmente, dos custos relativos de implantação e operação de uma ou duas redes.

No caso dos países em desenvolvimento, a adoção do sistema tipo misto tem permitido uma maior velocidade de implantação e abrangência do Sistema de Esgoto Sanitário, pois com a implantação de uma única rede leva-se mais rapidamente e, com custos de implantação menores, o saneamento tão necessário ao ser humano.

A questão do tipo de sistema de coleta tem sido alvo de inúmeras discussões o que não é objeto deste trabalho. Cabe ser ressaltado que no caso do Brasil e, mais

especificamente, da cidade de Porto Alegre, tem sido adotados os dois sistemas, ou seja, determinadas áreas são cobertas por sistema separador absoluto e outras por sistema misto.

## 2.2. TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS

O tratamento de esgotos domésticos é um ramo cujas técnicas foram todas desenvolvidas nos últimos 50 anos. Hoje, com os recursos técnicos disponíveis, é possível se alcançar elevados graus de tratamento dos esgotos que são gerados em uma cidade, já existindo instalações em funcionamento, em regiões onde há escassez de recursos hídricos, que chegam a reutilizar a água proveniente do tratamento, para o consumo.

Nos países em desenvolvimento, grandes investimentos têm sido realizados para aumentar os percentuais de coleta e de tratamento dos esgotos sanitários. Ao mesmo tempo em que procura-se elevar graus de tratamento, busca-se obter um efluente cada vez mais puro (tratado).

Dos processos de tratamento de esgotos geram-se duas fases, uma que é o efluente líquido tratado e outra que são os sólidos restantes do processo, os quais são denominados de **Lodos**. Pode-se dividir o tratamento de esgotos sanitários em duas fases, a fase líquida e a fase sólida.

A parte sólida é considerada o resíduo do processo de tratamento e, como cada vez mais tem sido intensificadas os níveis de tratamento, tem-se como consequência aumentos nos volumes deste resíduo.

Nos sistemas de coleta de esgotos mistos, os esgotos cloacais e pluviais são coletados conjuntamente, o que acrescenta no material a ser tratado outros componentes como: metais pesados, compostos químicos perigosos e partículas sólidas presentes na atmosfera, nas ruas e calçadas.

As ETES (Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários), muitas vezes, tratam dos esgotos sanitários e dos esgotos pluviais ao mesmo tempo, excetuando-se os períodos de

fortes chuvas onde, o volume pluvial torna-se muito grande e então é lançado diretamente aos corpos receptores.

Devido a complexidade e abrangência dos dois tratamentos (líquido e Sólido) aborda-se neste trabalho, cada um em um item, sendo dada maior ênfase à fase sólida (Lodo).

## **2.3 TRATAMENTO DA FASE LÍQUIDA**

Os níveis de tratamento mais utilizados são o preliminar, primário e secundário. A principal ênfase tem sido dada ao nível secundário, pois dentre os citados é o único capaz de cumprir a legislação relativa aos padrões de lançamento (SPERLING, 1999). Sistemas terciários e quaternários já vem sendo utilizados em alguns países desenvolvidos, porém não são aplicados em grande escala, principalmente pelo alto custo de suas implantações.

Os principais sistemas de tratamento de esgotos domésticos em nível secundário são:

- sistemas de lagoas de estabilização;
- sistemas de Lodos ativados;
- sistemas de filtros biológicos;
- sistemas anaeróbios;
- sistemas de disposição no solo.

Dentre os diferentes sistemas de tratamento de esgotos domésticos em nível secundário, os que mais tem sido utilizados são os por lagoas de estabilização e por Lodos ativados.

### **2.3.1 Lagoas de Estabilização**

Os sistemas de tratamento por lagoas de estabilização podem ser realizados de quatro formas diferentes, apresentados esquematicamente FIGURA 2.2: quais sejam (SPERLING, 1999):

- Lagoas Facultativas : Neste sistema a DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) solúvel e finamente particulada é estabilizada aerobiamente por bactérias dispersas no meio líquido, ao passo que a DBO suspensa é estabilizada anaerobiamente por bactérias no fundo da lagoa. O oxigênio requerido pelas bactérias aeróbias é fornecido pelas algas, através da fotossíntese .
- Lagoa Anaeróbia- Lagoa Facultativa : A DBO é em torno de 50% estabilizada na lagoa anaeróbia, que é mais profunda e com menor volume, enquanto a DBO restante é removida pela lagoa facultativa.
- Lagoa Aerada Facultativa: Os mecanismos de remoção da DBO são similares aos de uma lagoa facultativa. No entanto, o oxigênio é fornecido por aeradores mecânicos, ao invés da fotossíntese. Como a lagoa é também facultativa, uma grande parte dos sólidos do esgoto e da biomassa sedimenta.
- Lagoa Aerada de Mistura Completa- Lagoa Facultativa : A energia introduzida por unidade de volume da lagoa é elevada, o que faz com que os sólidos, principalmente a biomassa, permaneçam dispersos no meio líquido, ou em mistura completa. A decorrente maior concentração de bactérias no meio líquido aumenta a eficiência do sistema na remoção da DBO, o que permite que a lagoa tenha um volume inferior ao de uma lagoa facultativa. No entanto, o efluente contém elevados teores de sólidos (bactérias), que necessitam ser removidos antes do lançamento no corpo receptor. A lagoa facultativa a jusante proporciona condições para esta remoção, além de promover um polimento no efluente.
- Lagoa Aerada de Mistura Completa- Lagoa de Decantação: Similar ao sistema anterior, com a diferença de que a unidade de decantação é constituída por uma lagoa de menores dimensões. O Lodo da lagoa de decantação deve ser removido em períodos de poucos anos.

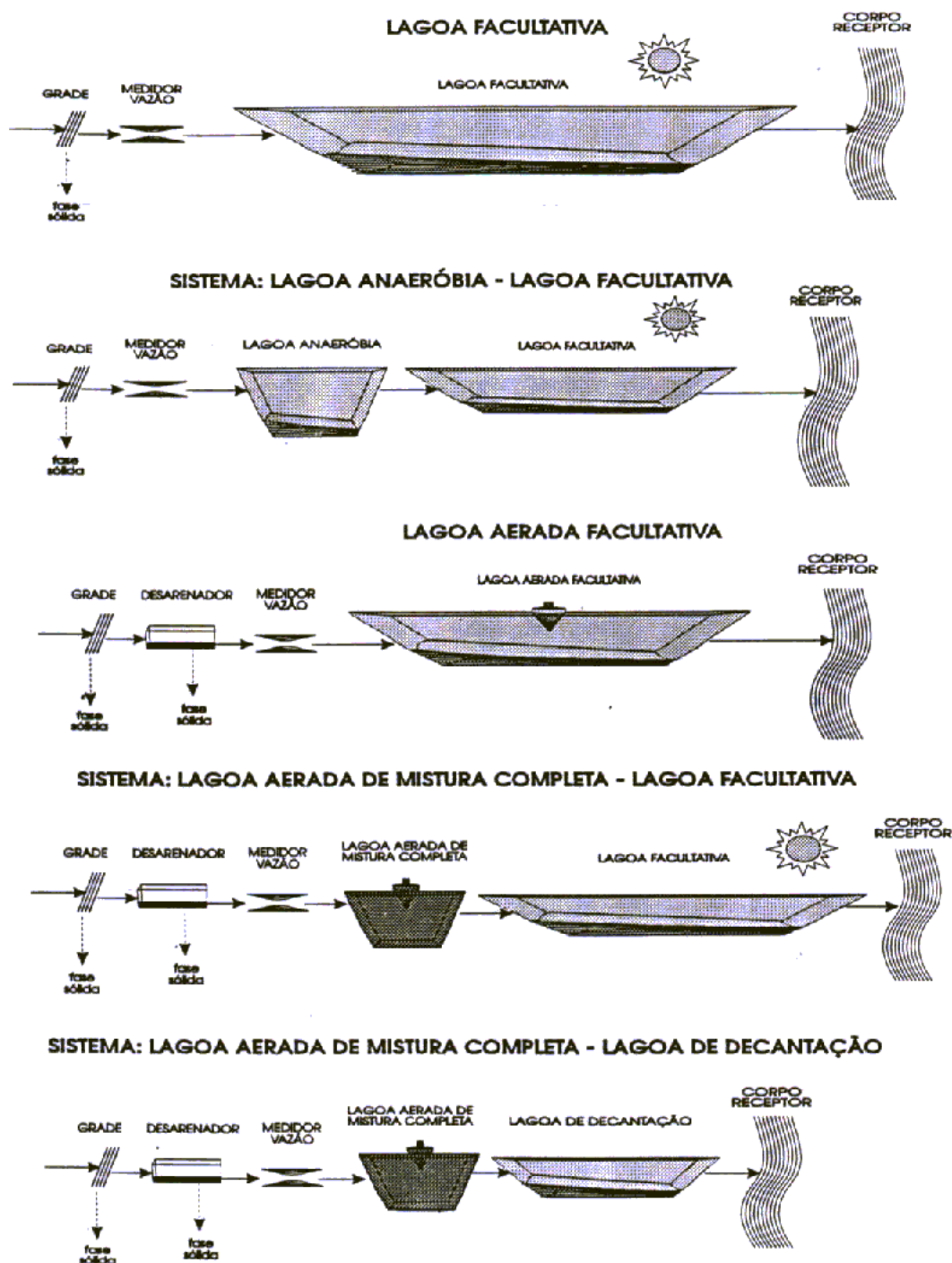


FIGURA 2.2 Esquema de funcionamento dos Sistemas de Tratamento de Esgotos Sanitários Domésticos por Lagoas de Estabilização (SPERLING, 1999)



A Foto 2.1 apresenta uma visão aérea da ETE Lami na cidade de Porto Alegre que é do tipo Lagoas de Estabilização



FOTO 2.1 ETE Lami em Porto Alegre

### **2.3.2 Lodos ativados**

Os sistemas de tratamento de esgotos sanitário por Lodos ativados tem sido cada vez mais utilizados, principalmente em grandes centros urbanos, pois permitem com pequenas áreas se tratar grandes quantidades de esgotos. Podem ser executados de três formas, quais sejam (ANDREOLI et al., 1999):

- Lodos ativados convencional: A concentração de biomassa no reator é bastante elevada, devido à recirculação dos sólidos (bactérias) sedimentados no fundo do decantador secundário. A biomassa permanece no sistema mais tempo do que o líquido, o que garante uma elevada eficiência na remoção da DBO. Há uma necessidade da remoção de uma quantidade de Lodo (bactérias) equivalente à que é produzida. Este Lodo removido necessita de um posterior tratamento, ou seja, uma nova etapa no processo chamada tratamento do Lodo. O fornecimento de oxigênio é feito por aeradores mecânicos ou por ar difuso. A montante do reator há uma unidade de decantação primária, de forma a remover os sólidos sedimentáveis do esgoto bruto.
- Lodos ativados por aeração prolongada: Similar ao sistema anterior, com a diferença que a biomassa permanece mais tempo no sistema, sendo para tanto os tanques de aeração maiores. Com isto, há menos DBO disponível para as bactérias, o que faz com que elas se utilizem da matéria orgânica do próprio material celular para sua manutenção. Em decorrência, o Lodo excedente retirado (bactérias) já sai estabilizado. Não se incluem normalmente unidades de decantação primária.
- Lodos ativados de fluxo intermitente: A operação do sistema é intermitente. Assim, no mesmo tanque ocorrem, em fases diferentes, as etapas de reação ( aeradores ligados) e sedimentação (aeradores desligados). Quando os aeradores estão desligados, os sólidos sedimentam, ocasião em que se retira o efluente (sobrenadante). Ao se religar os aeradores, os sólidos sedimentados retornam à massa líquida, o que dispensa as elevatórias de recirculação. Não há decantadores secundários.

Os sistemas de tratamento de esgotos domésticos por Lodos ativados são apresentados esquematicamente na FIGURA 2.3

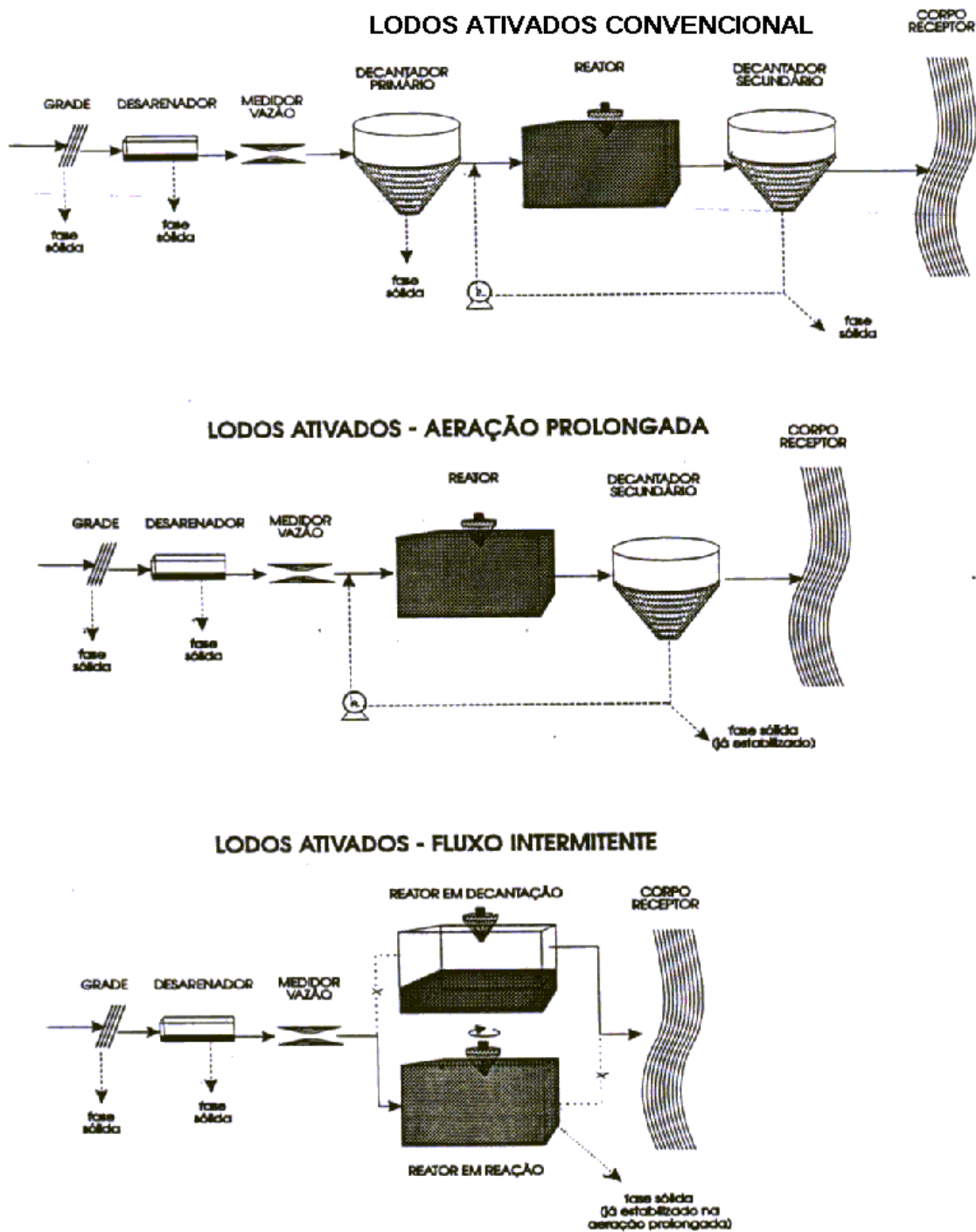


FIGURA 2.3 Esquema de funcionamento dos Sistemas de tratamento de esgotos domésticos por Lodos ativados (SPERLING, 1999).

## 2.4 TRATAMENTO DA FASE SÓLIDA

O Tratamento dos resíduos ou subprodutos sólidos, gerados nas diversas etapas, é uma parte especial do tratamento de esgotos. Ainda que o Lodo possa, na maior parte das etapas do seu manuseio, ser constituído de mais de 95% de água é, por convenção, designado de fase sólida, visando distinguir este material do fluxo líquido que é tratado (METCALF e EDDY, 1991; MALINA, 1993; LUCERO E MALINA, 1998 e VAN HAANDEL e LETINGA, 1994).

De uma forma geral, os resíduos sólidos gerados no tratamento biológico de esgotos são os seguintes:

- Material gradeado;
- Areia;
- Escuma;
- Lodo primário;
- Lodo secundário.

Dos subprodutos pertencentes à fase sólida do tratamento, o principal, em termos de volume e importância, é o representado pelos Lodos. Determinados sistemas de tratamento têm a retirada do Lodo apenas eventual. Nestes casos, o Lodo usualmente já sai parcialmente estabilizado, sendo, portanto, mais fácil sua disposição final. Em outros casos, o Lodo é retirado freqüentemente, ou mesmo continuamente, podendo sair não estabilizado ou parcialmente estabilizado.

Os fluxogramas de tratamento de Lodos possibilitam diversas combinações de operações e processos unitários, compondo distintas seqüências. As principais etapas do tratamento utilizadas são:

- Adensamento: nesta etapa visa-se a remoção parcial da umidade, com a conseqüente redução de volume.
- Estabilização: remoção de parte da matéria orgânica, através da redução dos sólidos voláteis.

- Condicionamento: é o preparo para a desidratação do Lodo.
- Desidratação: remoção da umidade.
- Incineração: queima do Lodo parcialmente desidratado;
- Desatinação final: refere-se às formas de destinação final dos resíduos sólidos.

#### **2.4.1 Classificação dos Lodos**

Como já foi observado no item 2.2., nos sistemas de tratamento de esgotos sanitários são geradas duas fases: uma chamada líquida, que é o efluente líquido tratado e que é lançado de volta ao manancial, e outra que constitui-se de uma mistura de sólidos com água com a aparência de um Lodo, que fica na ETE para posterior tratamento e estabilização.

Estes resíduos, formados pelos sólidos em suspensão removidos da fase líquida, podem penetrar na ETE (Estação de Tratamento de Esgotos) carregados pelo próprio esgoto bruto, podem ser gerados no próprio processo de tratamento ou podem ser adicionados ao esgoto no tratamento.

Também é denominado Lodo “in natura”, o Lodo que sai da ETE. Constitui-se normalmente de uma forma praticamente líquida, que corresponde a aproximadamente 1% a 2% dos esgotos sanitários, sendo composto por cerca de 98% a 99% de água, apresentando uma coloração similar ao petróleo cru.

Conforme ANDREOLI (1999), a denominação Lodo é genérica para os sólidos que se acumulam no sistema de tratamento de esgotos e que devem periodicamente ou continuamente, de acordo com o tipo de tratamento, serem descartados. O lodo é uma mistura de matéria orgânica e inorgânica.

#### **2.4.1.1 Classificação quanto à formação**

O Lodos podem ser classificados em três tipos: os Lodos primários, os Lodos secundários e Lodos mistos.

Os Lodos removidos nos decantadores primários ou em flotores formam o denominado Lodo primário.

Os sólidos em suspensão formados nos processos de tratamento e os microorganismos gerados no interior dos reatores biológicos nas ETES de Lodo ativado e de filtração biológica constituem o Lodo secundário. Geralmente são removidos nos decantadores secundários, o que dá origem ao nome.

Em algumas Estações de Tratamento, o Lodo secundário é encaminhado para a entrada do decantador primário e daí removido para o destino final. Neste caso chama-se esta mistura de Lodo misto.

Tanto o Lodo primário, o secundário como o misto apresentam uma elevada fração de matéria orgânica, materiais poluentes e patogênicos.

Destaca-se que o Lodo secundário tem uma natureza bastante distinta, em relação ao lodo primário. O Lodo secundário tem a maioria dos seus componentes gerados no reator biológico, sendo assim constituído principalmente por microorganismos, produtos extracelulares e resíduos que não foram removidos no tratamento primário ( ANDREOLI, 1999)

#### **2.4.1.2 Classificação quanto ao teor de umidade**

Conforme LUDUVICE et al. (1995), o enfoque dos projetos de estações de tratamento de esgotos sanitários vem sendo gradualmente mudado ao longo da última década. Existe uma tendência mundial pela adoção de processos que produzam um Lodo mais seco e, portanto, com menor volume. Esta tendência facilita a disposição final ou o aproveitamento do resíduo.

O meio técnico e as Companhias de Saneamento Básico (DMAE, 1978, DMAE, 1996 e SANEPAR, 1994) para fins de um melhor entendimento do grau de umidade que os Lodos são apresentados, os tem classificados em quatro grupos: Lodos “in natura”, fresco ou úmido, Lodo parcialmente desidratado, Lodo seco e Lodo incinerado.

O Lodo “in natura” é aquele retirado logo após o processo de tratamento de esgotos e que apresenta um teor de umidade em torno de 98%.

O Lodo parcialmente desidratado é aquele que passa por um processo de desidratação, que pode ser tanto mecânico como natural, como por exemplo a centrifugação ou secagem em leitos de secagem. Nesta fase, o Lodo tem uma aparência de material seco, porém ainda apresenta elevado teor de umidade, que pode estar entre 30 a 50% da sua massa. A Foto 2.2 mostra um detalhe do Lodo úmido imediatamente após seu descarte e no leito de secagem.



FOTO 2.2 Lodo úmido após seu descarte

Na Foto 2.3 apresenta-se o Lodo depositado, após ter sido parcialmente seco no leito de secagem.



FOTO 2.3 Lodo parcialmente seco após ser retirado do leito de secagem.

Como pode ser observado na Foto 2.3, ocorre um rápido aparecimento de vegetação no Lodo depositado, devido a sua ainda grande umidade e elevada carga orgânica.

O Lodo seco é o material formado por mais de 99% de sólidos, o qual somente pode ser obtido mediante processo de secagem artificial através de estufas. Não é um material obtido diretamente em algum dos processos usuais de tratamento. A obtenção de Lodo seco tem como objetivo facilitar as condições de análises do material em laboratórios. Geralmente a secagem é realizada em estufas de laboratório, portanto sempre em pequenas quantidades.

O Lodo incinerado é a cinza resultante do processo de incineração tanto do Lodo seco como do Lodo desidratado, o que normalmente ocorre em temperaturas entre 550°C e 950°C. Também é denominado de Cinza de Lodo Sanitário ou Cinza de Lodo.



### 2.4.2 Tipos de Processamento de Lodos

O Lodo, devido às características mencionadas, necessariamente deve passar por processos de estabilização, os quais são denominados processamento dos Lodos, antes de serem levados ao destino final.

Conforme ANDREOLI (1999), os Lodos gerados pelos processos físicos e biológicos das estações de tratamento de esgotos apresentam algumas características indesejáveis que dificultam a sua manipulação e processamento, como : odores desagradáveis, presença de microrganismos patogênicos, elementos tóxicos de origem orgânica ou mineral e dificuldade de desidratação. Estas características são mais marcantes a medida em que o material se encontram mais próximo da sua origem

A estabilização refere-se às tecnologias onde se utilizam aditivos ou processos para alterar o estado físico do resíduo, o que facilita o manuseio, o acondicionamento, o transporte e a disposição final do mesmo e, principalmente, torná-lo menos tóxico por imobilização física e/ou química dos constituintes do resíduo (CLAUDIO, 1987; BARTH et al., 1990)

Portanto, a estabilização tem como objetivos : melhorar as características físicas e de manuseio, diminuir a área superficial através da qual possa ocorrer a transferência ou perda de poluente, limitar a solubilidade ou destoxificar quaisquer constituintes perigosos contidos no resíduo (PAVAN, 1985).

As formas de estabilização do Lodo iniciam-se por digestão aeróbia ou anaeróbica durante um certo período de tempo. O volume do Lodo é também reduzido com a secagem natural ou mecânica para que possa ocorrer seu manuseio e processamento de uma forma mais higiênica em volumes menores. Como última fase do processo, antes da disposição final, tem se utilizado a incineração, o que reduz significativamente o volume de resíduo e elimina a matéria orgânica (DMAE, 1996).

As técnicas hoje existentes tem possibilitado a utilização normal das seguintes etapas de tratamento dos Lodos: o adensamento, a digestão, a desidratação e, em alguns

casos, a incineração. A adoção destas quatro fases de tratamento ainda não são suficientes para se obter o material satisfatoriamente estabilizado, o que tem requerido que, após o tratamento, o material seja ainda processado para que possa ter uma disposição final segura e estável (METCALF e EDDY 1991).

Conforme LUCER e MALINA (1998), a incineração tem um significativo efeito na redução de organismos patogênicos orgânicos do Lodo, o que tem levado a que cada vez mais seja introduzida no processo.

#### **2.4.2.1 Adensamento**

O adensamento de Lodo consiste em iniciar a eliminar o excesso de água, aumentando a concentração de sólidos, tornando menores as unidades de desidratação. Esta fase do tratamento pode ser realizada em tanque de espessamento por gravidade, por centrifugação ou por flotação. O processo mais usual é por gravidade, que é aplicado ao Lodo úmido em tanques de profundidade não inferior a 3m.

O acondicionamento do Lodo é realizado com o fim expresso de melhorar suas características de adensamento e desidratação. O método mais utilizado como acondicionador prévio à desidratação mecanizada é o acondicionamento químico.

Para permitir uma melhor estabilização do Lodo, dentro do processo de tratamento, pode-se utilizar a desestabilização química, que consiste na adição de substâncias químicas ao Lodo (FARREL,1974; METACALF e EDDY,1992).

Conforme MALINA (1993), uma definição possível para o processo de estabilização do Lodo é a “ transformação parcial do Lodo por agentes químicos, físicos ou biológicos de modo que a maior parte putrescível do Lodo seja destruída ou inativada, o que torna o resíduo inócuo”.

Ao serem misturados ao Lodo os componentes químicos promovem a coagulação dos sólidos e a liberação da água absorvida. Esta etapa ocorre antes da desidratação por centrifugação, filtração a vácuo, filtração com filtro de placas e filtração com filtro cinta (CARCERES, 1993). Os produtos químicos mais utilizados como aditivos são:

- $\text{FeCl}_3$  - cloreto férrico;
- $\text{Ca(OH)}_2$  - cal hidratada;
- $\text{CaO}$  – cal;
- $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  - Sulfato de alumínio;
- $\text{FeSO}_4$  - Sulfato ferroso;
- $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$  - Sulfato férrico.

Estes reagentes podem ser usados na agregação de partículas e melhorar processos de filtração, sedimentação e centrifugação em operações de deságüe.

Muitas vezes somente a cal tem sido utilizada, devido ao seu baixo custo e eficiência no processo de desinfecção do Lodo. Com a adição de cal os microorganismos envolvidos na decomposição dos Lodos e grande parte dos patogênicos orgânicos são severamente inibidos, inativados ou destruídos em parte pelos altos níveis de pH (IDE,1994). A utilização da cal permite a eliminação por exemplo de germes patogênicos

#### **2.4.2.2 Digestão**

Dentre os processos de digestão de Lodo Sanitário, o mais empregado é a decomposição anaeróbia, que é realizada sob condições controladas e com as seguintes finalidades (IMHOFF,1996) :

- Destruição ou redução das bactérias patogênicas;
- Redução e estabilização da matéria orgânica dos Lodos úmidos;
- Redução do volume de Lodos;
- Facilitar a secagem dos Lodos resultantes;
- Produção e aproveitamento do biogás.

As condições que influenciam diretamente na digestão são (IMHOFF,1996):

- Inoculação, que consiste na adição diária de Lodos frescos em quantidade adequada ao Lodo digerido, estabelecendo o equilíbrio indispensável a uma digestão rápida. A quantidade de biogás produzido não é acrescida pela inoculação, no entanto a velocidade de produção é alterada, no sentido de dar ao processo maior uniformidade;
- O pH favorável situa-se na faixa acima do neutro, entre 7,0 a 7,4, podendo ser necessária e conveniente a adição de álcalis, o que pode ser através da adição de cal hidratada, para ajustar o pH.
- Temperatura: As zonas ótimas para o processo são de 30°C a 40°C para digestão mesófila e de 45°C a 57°C para digestão termófila. Em digestores não aquecidos, a temperatura raramente ultrapassa a 22°C. O período de retenção nos digestores primários, para a digestão técnica, é função das seguintes faixas de temperatura, 15°C-55 dias, 20°C-45 dias, 25°C-35 dias, 30°C-28dias, 35°C-25 dias.
- Agitação: A mistura do material contido nos digestores, Lodos em digestão com os Lodos frescos introduzidos , contribui para acelerar e melhorar o processo de digestão. A mistura pode ser feita com equipamentos especiais chamados agitadores mecânicos, com recirculação de Lodos por meio de bombas ,ou ainda fazendo-se recircular os gases mediante o uso de compressores.
- Redução do volume de Lodos com a digestão: a relação volumétrica Lodo digerido/Lodo fresco, segundo a operação pode ser: no Lodo fresco de 1, no Lodo digerido por precipitação química de 0,34, no Lodo digerido por filtração biológica de 0,32 e nos Lodos ativados digeridos de 0,41.

### **2.4.2.3 Desidratação**

Após a digestão dos Lodos, estes são submetidos a um processo de retirada de parte da água que contem, ou seja, a um processo de desidratação (ANDREOLI, 1999).

A desidratação tem com principal objetivo a redução do volume de Lodo para facilitar as operações de transporte, continuidade e beneficiamento visando seu aproveitamento como insumo ou disposição final.

São utilizados processos naturais como lagoas de Lodo, leitos de secagem, ou processos mecânicos como prensas ou centrífugas. Estes últimos são considerados processos artificiais ou mecanizados (PULKOW e AISSE, 1996).

#### **2.4.2.3.1 Lagoa de Lodo**

A técnica consiste na disposição dos Lodos para secagem em depressões naturais do terreno ou em escavações realizadas para este fim. Salienta-se que esta técnica vem sendo abandonada devido aos prejuízos ambientais que pode causar no solo e nos recursos hídricos, principalmente em solo permeáveis.

#### **2.4.2.3.2 Leitos de secagem**

São unidades especialmente construídas para a secagem dos Lodos. O processo permite uma boa eficiência na desidratação.

A secagem natural, através de leitos, é o método mais antigo e econômico dentre os utilizados. Os leitos de secagem consistem em tanques rasos de piso drenante, executados sobre o próprio terreno, nos quais se descarrega o Lodo úmido até uma altura de 30 cm. O piso do leito é geralmente formado por tijolos maciços com juntas de 2,5 cm feitas com areia, assentados sobre uma camada de brita cuja granulometria aumenta de cima para baixo, disposta sobre um fundo inclinado permeável. Parte do líquidos dirige para baixo, penetra no piso drenante, e é removido por gravidade para a entrada da ETE. Outra porção do líquido se evapora pelo contato direto com a atmosfera.

A secagem em leitos é um método bastante eficiente no tratamento do Lodo, apresentando uma desidratação de aproximadamente 70%, porém encontra limites de utilização em regiões onde o índice pluviométrico é muito elevado. Em regiões não muito secas, como é o caso das regiões sul e sudeste do Brasil, pode-se estimar o tempo de secagem em leitos em 20 dias.

Na Foto 2.2 visualiza-se um típico leito de secagem ao sol.

#### **2.4.2.3.3 Centrifugação**

As centrífugas horizontais são equipamentos que promovem a desidratação do Lodo por centrifugação, em operação contínua. Constam de um tambor cilíndrico com uma extremidade cônica dentro do qual está instalado um parafuso concêntrico com o eixo. Tanto o tambor quanto o parafuso giram rapidamente, porém com pequena diferença de velocidade entre ambos. Esta diferença faz com que o helicóide empurre lentamente para uma das extremidades os sólidos projetados contra a parede do tambor por efeito da força centrífuga.

AISSE et al. (1998) desidratou Lodos em centrífugas, sem adição de coagulantes, chegando a um teor de umidade da torta, para Lodos de diversas origens, de 73,6%, ou seja, um teor de sólidos de 26,4%.

Informações dadas pelo fabricante de centrífugas depreciam que estas desidratam parcialmente os Lodos, podendo-se reduzir cerca de 70 a 80% da umidade destes (WESTFALIA SEPARATOR, 1993).

#### **2.4.2.3.4 Filtros Prensa de Placas e Quadros**

É constituído por uma série de placas verticais mais espessas nas bordas do que nas partes centrais, revestidas de tela filtrante em ambas as faces.

Durante a operação de filtração as placas são ajustadas umas contra as outras de tal forma que formam um “saco filtrante”.

O Lodo é introduzido nos “sacos” através de uma tubulação localizada na parte central, por bombeamento, com pressão crescente. O líquido intersticial atravessa as telas filtrantes, deixando entre elas uma “torta” que ocupa o espaço entre as telas. À medida que as tortas de Lodo se formam entre as placas, a pressão de alimentação aumenta até atingir o valor limite da operação.

As tortas caem para dispositivos de coleta, sendo retiradas para disposição final. A eficiência, em termos de desidratação, é de 50% a 70%.

#### **2.4.2.3.5 Filtros Prensa de Cinta**

No filtro prensa de Cinta o Lodo é introduzido continuamente entre duas correias que se deslocam por entre roletes. O processo inclui três estágios operacionais básicos: condicionamento do Lodo; drenagem gravitacional e desidratação por compressão.

Na zona de desidratação o Lodo é submetido a pressões crescentes à medida que avança entre os roletes. Na extremidade, uma lâmina raspadora remove o Lodo seco.

Este sistema apresenta uma eficiência próxima as das centrífugas (DMAE, 1996).

#### **2.4.2.3.6 Filtros a Vácuo**

O Filtro a vácuo promove a desidratação do Lodo através da diferença de pressão entre duas faces de um meio filtrante, operando continuamente.

O meio filtrante é constituído por tecidos sintéticos que envolvem um tambor, no qual é realizado o vácuo. Este sistema apresenta uma eficiência entre 50% e 70% (DMAE, 1996)

#### 2.4.2.4 Incineração

A incineração é o processo que utiliza a queima, como tratamento dos resíduos, reduzindo significativamente o seu volume original e proporcionando melhores condições para a sua disposição.

A incineração e processos correlatos (oxidação úmida, entre outros) é considerada por alguns autores como uma etapa do tratamento dos Lodos (AZIZ e RAMASWAMY, 1992; SAITO, 1994) e por outros como uma das alternativas de disposição final do resíduo (KANEZASHI e MURAKAMI, 1991).

O que seria considerada uma forma de disposição dos resíduos no ar, não é considerada pelos primeiros como uma forma de disposição final, mas uma etapa do processo, na qual realiza-se a total desidratação, eliminação da matéria orgânica e redução da quantidade de resíduo.

A polêmica se estabelece favoravelmente a esta tese quando se observa que a existência de uma cinza como resíduo da incineração, configura que ainda existe, embora em menor volume, um resíduo a ser disposto e com uma composição que pode ser mais nociva, por aumentar a concentração de alguns compostos perigosos.

Enfocada então como um tratamento intermediário para os Lodos, esta alternativa passou, na década de 90, a ser considerada como o indispensável caminho para efetivamente dispor ou utilizar os resíduos de uma forma segura.

Segundo AZIZ e RAMASWAMY (1992), a incineração tem se tornado um dos principais métodos para tratamento dos resíduos municipais, particularmente nas grandes cidades. Este processo reduz significativamente o volume de resíduo seco, na ordem de 80%, e elimina a necessidade de se trabalhar com grandes volumes e com grandes áreas para disposição do material.

Conforme SAITO (1994), a incineração é, do ponto de vista sanitário, o mais seguro processo no tratamento de resíduos sanitários como lixo ou Lodos, uma vez que reduz a cinzas os materiais combustíveis, em sua grande maioria também decomponíveis, tornando-os bastante inertes se comparados ao seu estado original.



Este processo tem sido cada vez mais utilizado no tratamento de Lodos de esgotos sanitários, tendo em vista que a disposição final das cinzas resultantes é bem mais fácil que a do material original.

#### **2.4.2.5.1 Tipos de Incineração**

A incineração dos Lodos se processa geralmente em fornos de múltiplos estágios ou em fornalhas de leito fluidizado.

O forno de múltiplos estágios consiste em uma estrutura cilíndrica, vertical, composta por vários estágios ou andares. Nestes fornos o Lodo seco, a um teor de umidade inferior a 70%, é introduzido no nível superior e vai sendo empurrado por dispositivos mecânicos para os estágios inferiores. O ar pré aquecido é introduzido junto ao estágio inferior, e flui de baixo para cima. Nos estágios superiores se processa a vaporização da umidade e o esfriamento dos gases. Os compostos voláteis do Lodo entram em combustão nos estágios intermediários, enquanto nos estágios inferiores se processa a queima lenta dos compostos de difícil combustão, e o arrefecimento das cinzas. As cinzas são removidas do incinerador por uma abertura na parte inferior do mesmo, após um período de resfriamento das mesmas (ENVIRONMENT BUREAU OF KITAKYUSYU, 1997).

A temperatura no interior da fornalha varia de cerca de 550 °C nos estágios superiores, 700 °C a 1000 °C nos estágios intermediários, a cerca de 350 °C nos estágios inferiores, onde já inicia-se o resfriamento do resíduo resultante. Nos estágios intermediários, onde realmente se processa a queima, as temperaturas podem ser controladas, sendo usual a de 800°C.

A capacidade de incineração depende do porte do equipamento, sendo que já existem incineradores de fornos de múltiplos estágios com capacidade de queimar de 5 a 1250 toneladas de Lodo por dia.

O outro tipo de incinerador que pode ser utilizado, leito fluidizado, consiste em um recipiente que contém um leito de areia sobre o qual o Lodo introduzido escoar. A areia é

pré-aquecida até cerca de 800 °C. A combustão do material volátil do Lodo, e se necessário do combustível utilizado, provoca um fluxo ascendente do ar, introduzido na parte inferior do recipiente e gases oriundos da combustão que mantêm o conteúdo homogêneo, sem a necessidade de equipamento de mistura.

O tipo de incineração que vem sendo mais utilizado é o de fornos de múltiplos estágios, devido à eficiência, alta capacidade de incinerar e possibilidade de controle da emissão de gases na atmosfera (ACE PLAN, 1990).

Qualquer que seja o tipo de equipamento utilizado deve possibilitar a instalação de dispositivos de controle da emissão de gases na atmosfera, de modo a evitar a poluição (KASAI, 1983).

Conforme estudos realizados pelo ENVIRONMENT BUREAU OF KITAKYUSYU (1997), a incineração de Lodos de esgotos sanitários a temperatura de 800°C tem sido adotada com sucesso nas estações de tratamento japonesas. Quanto ao controle da poluição os sistema é dotado de precipitadores eletrostáticos que captam as fulígens tóxicas dos gases emanados, tornando estes não poluentes.

Recentes desenvolvimentos tecnológicos reduziram significativamente o custo operacional dos incineradores, tornando-os alternativas economicamente viáveis para tratar quantidades acima de 2000 toneladas/ano, o que representa uma população de aproximadamente 55000 habitantes com esgotamento sanitário (KUBOTA MELTING FURNACE, 1995).

KUBOTA MELTING FURNACE (1995), em testes realizados em vários países, concluiu que a redução de volume produzida pela incineração de Lodos desidratados de tratamento de esgotos é de aproximadamente 1/22 e a redução de massa de 1/16 , o que comprova a eficiência do método no que se refere à redução de quantidade de resíduo.

#### **2.4.5.2 Controle da emissão de gases na incineração**

Conforme NILSSON (1994), durante os últimos anos, as exigências relativas a emissões na incineração de resíduos aumentaram acentuadamente. Este fato vem ocorrendo

devido ao grande aumento nas quantidades de resíduos incinerados, que conseqüentemente lançam mais gases na atmosfera.

Em 1985, as atenções voltaram-se para a Suécia, que suspendeu a construção de novos equipamentos de incineração, enquanto eram aguardados os resultados de um estudo sobre a energia e os aspectos ambientais envolvidos na incineração de resíduos. O estudo era uma conseqüência da preocupação da autoridades e do público, com relação as dioxinas e a incerteza que envolvia o impacto desses compostos sobre a saúde humana e o meio ambiente. Em 1986 o relatório “A Energia do Lixo” foi apresentado e a conclusão geral do estudo foi que a incineração do lixo ou de resíduos domésticos, como por exemplos os Lodos, era um método aceitável de tratamento destes resíduos. Conforme NILSSON (1990), o relatório dos estudos realizados na Suécia mostrou que é possível reduzir substancialmente as emissões de poluentes, mediante a implementação de medidas para aperfeiçoamento das operações de incineração e para limpeza dos gases emanados.

Os padrões Suecos, estabelecidos em 1986, passaram a ser referencial mundial para emissões de gases de processos de incineração. A partir de 1986, em outros países, também foram estabelecidos padrões de emissão, os quais vieram a confirmar os limites estabelecidos no padrão Sueco e acrescentar alguns outros itens a ser considerados. Estes padrões são apresentados na TABELA 2.1.

TABELA 2.1 Padrões limites de emissão para incineração de resíduos (NILSSON, 1990)

Tipo de Poluente (mg/mm <sup>3</sup> )	Alemanha 1989	CEE 1989	França 1990	Suécia 1986
CO	100	100	100	100
Poeira	30	30	50	20
SO <sub>2</sub>	100	300	-	-
Nox	500	-	-	-
HCl	50	50	100	100
HF	2	2	-	-
C/Cx Hy	20	20	10	-
Cd, Hg	0,2	0,2	0,3	0,1
As, Co, Se, Ni	1,0	1,0	1,0	-
Pb, Cr, Cu, Zn	5,0	5,0	5,0	-
Dioxinas (mg/mm <sup>3</sup> )	0,1	-	-	0,1
Média Amostral	Diária	Mensal		mensal
Referente a	11% O <sub>2</sub>	11% O <sub>2</sub>	7%CO <sub>2</sub>	10% CO <sub>2</sub>

Os incineradores de última geração já estão capacitados ao incinerar lixo ou resíduos como Lodo e a atender quaisquer das especificações acima estabelecidas, não obstante todas as operações de incineração devam ser executadas por mão de obra especializada e com controle periódico das emissões. Sabe-se que se as exigências com referência a emissões da incineração de resíduos forem mais rigorosas, haverá obviamente riscos de exclusão de certos métodos de incineração e também de elevar em muito os custos que já não são baixos para este processo.

Com o objetivo de comparar a incineração com outras alternativas, uma investigação realizada na Europa mostrou que aterros significam riscos potenciais de emissão de dioxinas, principalmente em casos de incêndios descontrolados, e nestes casos nenhum sistema de filtragem destas dioxinas estaria a disposição, ao contrário dos processos de incineração controlados (ISWA, 1990).

A partir do momento em que a incineração passou a ser entendida com um processo de queima como outro qualquer, como por exemplo a queima de combustíveis como carvão ou derivados de petróleo, observou-se que não existem razões para se estabelecer limitações, mais restritas, para a incineração, do que as estabelecidas para os outros processos.

O meio técnico, os organismos ambientais e os governos passaram a entender que a incineração com emissões controladas causam menos problemas ambientais que a simples disposição de resíduos no solo ou mesmo que a queima de combustíveis.

A TABELA 2.2 Apresenta um quadro comparativo de emissões entre a incineração de resíduos urbanos, entre eles o Lodo, e a queima de outros combustíveis.

TABELA 2.2 Emissões decorrentes da queima de óleo diesel, carvão e resíduo urbano para a obtenção de 2000 kwh (NILSSON, 1990)

<b>Emissão (kg/ano)</b>	<b>Resíduo até 1980</b>	<b>Resíduo a partir de 1989</b>	<b>Resíduo a partir de 1992</b>	<b>Óleo diesel</b>	<b>Carvão</b>
Dióxido de enxofre	*	10	5-10	30	8
Dióxido de nitrogênio	*	15	5-10	30	8
Hidrogenoclorados	3,6	2	1	*	1
Poeira	0,7	0,2	0,1	0,5	0,2

(\*) valores não medidos

Analisando-se os dados apresentados na Tabela 2.2, pode ser observado que os valores da incineração dos resíduos urbanos estão no mesmo patamar ou até abaixo dos valores da combustão de óleo diesel e carvão.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O TRATAMENTO DE ESGOTOS

Evidencia-se que cada vez mais os sistemas de tratamento de esgotos sanitários tem sido ampliados. Através de diferentes tecnologias já se consegue excelentes níveis do efluente final líquido, porém a parte sólida, chamada Lodo, tem sido o grande problema a ser solucionado.

Se o efluente líquido pode ser simplesmente lançado nos mananciais, com garantias de que não os poluirá, o mesmo não pode ser afirmado quanto aos Lodos, devido a sua composição nociva ao meio ambiente.

Grande parte das soluções para a fase sólida tem passado pela introdução da incineração no processo de tratamento. Este tipo de alternativa somente passou a ser utilizado a partir dos anos 80, porque, com o desenvolvimento de equipamentos modernos, foram reduzidas as concentrações de emanações perigosas advindas do processo.

Outra questão importante é a de que com a incineração se reduz significativamente o volume de resíduo, mas não o elimina totalmente. Pode-se dizer que se aumenta a

concentração de compostos poluentes, principalmente os metais. Decorre disto a necessidade de se dispor de forma segura as Cinzas geradas.

Quanto à poluição, eventualmente gerada pela incineração, o que se deve ter em mente é que se as exigências fossem exageradas, levariam a que a incineração fosse substituída por outros métodos, que certamente, no final, poderiam resultar em níveis mais altos de poluição ambiental e em maior consumo de energia. O clássico exemplo são os aterros executados com lixo ou com Lodos de tratamento de esgotos, que ainda são soluções utilizadas no mundo todo, mas que comprovadamente trazem enormes comprometimento ao meio ambiente.

Estabelecida a incineração no processo de tratamento passaram a ser desenvolvidas pesquisas para aproveitamento das cinzas geradas como subproduto industrial (ALLEMAN E BERMAN, 1990, JAPAN SEWAGE AGENCY, 1990, OKUNO e TAKAHASHI, 1997; TAY e SHOW, 1997, entre outros).

A incineração não se constitui de uma etapa final na estabilização do resíduo. A estabilização das Cinzas geradas passa a ser o problema, e neste sentido o aproveitamento destes resíduos, em especial na construção civil, tem sido apontado como uma das alternativas definitivas para utilização destas cinzas.

### **3 CARACTERIZAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL DOS LODOS**

A necessidade de disposição final segura dos Lodos de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários tem se tornado objeto de vários estudos (JAPAN SEWAGE WORKS AGENCY, 1990; DAME, 1996, ANDREOLI et al., 1999, entre outros).

De forma a se conhecer melhor a composição dos Lodos de ETE e seu potencial de disposição final ou mesmo aproveitamento, apresentam-se caracterizações químicas, físicas, morfológicas e ambientais realizadas no Brasil e no exterior em Lodos de diferentes ETES e também as alternativas apontadas pela bibliografia até hoje utilizadas na disposição final destes resíduos.

Apresentam-se caracterizações de várias plantas de Tratamento, como por exemplo:

- Da Estação de Tratamento de Esgotos Pinheiros, que é a maior Estação brasileira, gerando um Lodo, que por ser produzido numa grande área metropolitana, torna-se bastante característico;
- Da CAESB Companhia Estatal de Saneamento do Distrito Federal;
- Da ETE IAPI da cidade de Porto Alegre ao longo de dez anos de 1982 a 1992 e
- ETE de outros países.

#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LODOS PROVENIENTES DE DIFERENTES PLANTAS DE TRATAMENTO**

##### **3.1.1 Caracterização Química**

### 3.1.1.1 Caracterização química do Lodo úmido ou parcialmente seco

ANDREOLI et al. (1999) apresentam faixas de composição química e propriedades de Lodo úmido de esgoto, adaptada de METCALF e EDDY (1991), e também a composição típica de Lodos estudados no Brasil, as quais são apresentadas na TABELA 3.1..

TABELA 3.1 Composição química e propriedades de Lodo úmido de esgotos (METCALF e EDDY, 1991).

Item	Unidade	Faixa de composição	Composição típica
Sólidos totais	%	2,0 – 8,0	5,0
Sólidos Voláteis	%	60 – 80	65
Nitrogênio	%	1,5 – 4,0	2,5
Fósforo	%	0,8 – 2,8	1,6
Potássio	%	0 – 1	0,4
PH	-	5,0 – 8,0	6,0
Alcalinidade	Mg CaCO <sub>3</sub> /l	500 – 1500	600

Na TABELA 3.2 apresentam-se a caracterização dos Lodos gerados na cidade de Brasília, pelos seus valores médios, realizada pela CAESB (Companhia Estatal de Saneamento do Distrito Federal). Também nesta TABELA 3.2 são apresentados os valores médios de análises realizadas pelo DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgotos) na cidade de Porto Alegre (ETE IAPI) entre o período de 1982 a 1992 (DMAE, 1978; DMAE, 1995 e WALDEMAR, 1992).



TABELA 3.2 Características químicas dos Lodos parcialmente secos de ETES de Brasília e da ETE IAPI de Porto Alegre

Características	ETES de Brasília	ETE IAPI P. Alegre
<b>PH</b>	7,8 - 8,0	8,3
<b>Matéria orgânica</b>	66%	70%
<b>Ni</b>	6,5%	3,64%
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	4,0%	0,19%
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,4%	0,17%
<b>Zn</b>	0,08%	0,10%
<b>CaO</b>	5,0%	1,21%
<b>MgO</b>	0,5%	0,06%
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4,0%	2,09%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,0%	0,65%
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,2%	ND
<b>Cu</b>	0,02%	0,03%
<b>Mn</b>	0,02%	0,02%
<b>S</b>	ND	0,32%
<b>Ca</b>	ND	0,0002%
<b>Pb</b>	ND	0,02%
<b>Hg</b>	ND	0,0003%

**ND = Não detectado**

Observa-se, nas análises químicas, que os compostos sólidos dos Lodos parcialmente desidratados são formados principalmente por matéria orgânica, com percentuais acima de 66%. Os demais compostos, inorgânicos, apresentam-se em pequenos percentuais, sendo alguns de difícil detecção.

No caso da ETE IAPI foi detectada a presença de compostos nocivos em pequenos percentuais, como o Chumbo e o Mercúrio.

TILLER apud ANDREOLI (1999) e MIYAZAWA (1996) apresentam na TABELA 3.3 teores de metais pesados encontrados pelos pesquisadores em Lodos de ETE.

TABELA 3.3 Teores de metais pesados em Lodos de ETES ( TILLER apud ANDREOLI,1999 e MIYAZAWA , 1996).

<b>Metal pesado</b>	<b>Lodo de Esgoto dos EUA (%)</b>	<b>Lodos de Esgoto do Estado do Paraná (%)</b>
Cd	0,0002 – 0,1100	0,0002
Co	-	0,0014
Cr	-	0,0125
Cu	0,0084 – 1,0400	0,0401
Ni	0,0012 – 0,2800	0,0081
Pb	0,0800 – 2,6000	0,0268
Zn	0,0072 – 1,6400	0,1340

Conforme ANDREOLI (1999), compostos nocivos ao homem como metais pesados são indejáveis em qualquer material. As presenças dos metais pesados Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se e Zn (elementos que possuem massa específica maior que 6,0 g), na composição dos Lodos são motivos para se ter cuidados especiais que este resíduo.

### **3.1.1.2 Caracterização química do Lodo Incinerado**

Não existem ainda procedimentos específicos para a queima de Lodos sanitários. METCALF e EDDY(1992) comentam que os processos de incineração de Lodo envolvem temperaturas normalmente acima de 550°C, mas que pode ser considerado que até uma temperatura de 950°C não há variações significativas nos resíduos produzidos.

Na TABELA 3.4. apresentam-se análises químicas sobre os componentes encontrados em Lodos incinerados à 550°C na ETE Pinheiros de São Paulo, na ETE IAPI

de Porto Alegre, na ETE Tsukuda no Japão, na ETE Shiga no Japão e na ETE Hannover na Alemanha.

TABELA 3.4 Composição química de Lodos incinerados a 550 °C

<b>Composição química</b>	<b>ETE PINHEIROS (SARDINHA e MORINGO, 1992) (%)</b>	<b>ETE IAPI (média de 1982 1992) (WALDEMAR, 1992). (%)</b>	<b>ETE de Tsukuda (ENDO et al., 1997) (%)</b>	<b>ETE de Shiga (OKUNO et al., 1997) (%)</b>	<b>ETE de Hannover (WIEBUSCH e SEYFRIED, 1997) (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	51,74	55,2	51,9	46,6	36,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,58	13,00	15,6	26,0	14,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,51	3,00	7,3	5,0	5,6
CaO	4,57	0,28	6,2	8,6	10,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,69	ND	9,2	2,39	1,50
MgO	1,76	0,90	2,3	2,1	1,5
Na <sub>2</sub> O	0,37	ND	0,4	1,2	0,7
K <sub>2</sub> O	1,33	ND	0,6	0,7	1,2
Cr	0,21	0,01	0,3	0,09	0,45
Ni	0,04	ND	ND	ND	ND
Cu	0,08	ND	ND	ND	ND
Zn	ND	ND	ND	0,2	ND
As	ND	ND	ND	0,07	ND
Cd	ND	ND	ND	ND	ND
Pb	0,05	ND	0,01	ND	0,02
Hg	ND	ND	ND	ND	ND
Se	ND	ND	ND	ND	ND
Ba	0,01	ND	ND	ND	ND
MnO	0,24	ND	ND	ND	ND
S – SO <sub>3</sub>	1,92	ND	ND	ND	ND

Os principais compostos das cinzas obtidas a 550°C são SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO e Na<sub>2</sub>O, os quais perfazem entre 72% e 93% do total dos compostos presentes nos diferentes Lodos apresentados.

Destaca-se o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) como o principal composto das cinzas, estando presente em percentuais entre 36,2 a 55,2%.

Conforme GEYER, RECENA e SHULER (1995), visualmente e através do tato as cinzas são torrões bastante friáveis de coloração avermelhada. Da análise química das cinzas levanta-se a possibilidade da cor avermelhada demonstrar a presença do óxido de ferro e das partículas silicosas. Algumas partículas são brilhosas, demonstrando a presença provável de quartzo ou mica no resíduo.

Analisando-se os compostos químicos da TABELA 3.4 pode-se verificar que o teor de alguns deles ultrapassam os limites estabelecidos pelo Ministério do Meio Ambiente Francês, cujos padrões são universalmente aceitos e fazem parte da NBR 10004 – Norma de Resíduos Sólidos (ABNT, 1987), no que se refere à classificação destes como perigosos.

Observa-se por exemplo que no caso do Cromo (Cr) e do chumbo os limites da NBR 1004 (ABNT, 1987), de 0,01% e 0,1% respectivamente, são ultrapassados nos Lodos de diversas ETES, tornando estes resíduos potencialmente perigosos.

Na TABELA 3.5 apresentam-se análises químicas em Cinzas de Lodos incineradas a temperatura de 800 °C, a qual tem sido, nos últimos anos, a temperatura mais empregada para incineração de resíduos deste tipo.

TABELA 3.5 Análise química semiquantitativa por espectrometria de raios X das cinzas de Lodos sanitários obtidas em incineração no Japão e na Alemanha a temperaturas de 800 °C (WIEBUSH et al., 1998)

Composição química	Cinzas do Japão (%)				Cinzas da Alemanha (%)			
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
SiO <sub>2</sub>	28,9	56,5	54,4	46,7	56,8	57,5	58,1	59,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,1	11,9	4,1	8,2	18,3	20,3	19,2	20,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,2	4,4	3,7	4,2	10,9	7,0	5,8	6,1
CaO	26,0	6,5	13,2	18,3	3,0	4,1	6,4	4,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	8,5	5,1	2,0	3,6	2,9	3,5	2,7	2,5
MgO	2,6	0,9	1,3	1,9	1,2	1,2	1,3	1,5
Na <sub>2</sub> O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,4	0,5	0,4
K <sub>2</sub> O	0,6	0,9	0,3	0,7	3,8	3,8	3,7	4,0
Cr	1,0	0,3	ND	2,5	0,3	0,3	0,1	0,1
Ni	ND	ND	ND	ND	0,1	ND	ND	ND
Cu	ND	ND	ND	ND	0,1	0,3	0,1	0,1
Zn	-ND	ND	ND	ND	1,0	0,7	0,6	0,6
As	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cd	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pb	ND	0,5	ND	ND	0,1	ND	ND	ND
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Se	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

- ND = compostos não encontrados ou em percentual <0,1%

Os Lodos incinerados à 800 °C, TABELA 3.5, apresentam basicamente a mesma composição química dos incinerados a 550°C, apresentados na TABELA 3.4. Este fato vem demonstrar que, embora os Lodos sejam provenientes de diferentes plantas de tratamento de esgotos e queimados em diferentes temperatura, quimicamente apresentam características semelhantes. O fato de queimar em diferentes temperaturas não elimina nenhum composto, com a exceção da matéria orgânica, e seria de se esperar que não altrasse a composição química, como pode-se observar na TABELA 3.5.

Verificando-se os compostos químicos de diversas cinzas de Lodo Sanitário da TABELA 3.5 pode-se verificar que o teor de alguns compostos, também nesta temperatura de 800° C, ultrapassam os limites estabelecidos pelo Ministério do Meio Ambiente Francês (ABNT, 1987), o que se refere a classificação destes como perigosos.

Observa-se por exemplo que no caso do Cromo (Cr) o limite de 0,01% em massa é ultrapassado pela maioria das cinzas relacionadas. Também o teor de Mercúrio (Hg) cujo limite é de 0,1%, é excedido na cinza II e fica no limite na cinza V.

### **3.1.2 Caracterização Física**

#### **3.1.2.1 Caracterização Física dos Lodos úmido e parcialmente seco**

##### **3.1.2.1.1 Teor de umidade**

Através da análise da bibliografia sobre o assunto, constatou-se que os Lodos úmidos de ETE por Lodos ativados apresentaram teor de umidade entre 98% e 99,5% (SARDINHA e MORINGO, 1992;. WALDEMAR, 1992; ENDO et al., 1997; OKUNO et al., 1997; WIEBUSCH e SEYFRIED, 1997 e LUDUVICE, 1992))

Nos materiais parcialmente secos observaram-se as seguintes características: na ETE Pinheiros (SP) o teor de umidade após a centrifugação foi de 70%; nas amostras de Lodo da ETE IAPI (RS), coletadas nos leitos de secagem ao sol, os teores de umidade variaram entre 25 e 35% e na ETES de Brasília (DF) o teor médio de umidade do material desidratado, principalmente em filtros prensa, ficou entre 80 e 86%.

Obviamente os diferentes teores de umidade encontrados nos Lodos parcialmente desidratados estão relacionados como a tecnologia empregada no processo, sendo plenamente aceitável que, dependendo do processo, o teor de água possa ser bastante diferente.

### 3.1.2.2 Caracterização Física do Lodo Incinerado

Na ETE Pinheiros (SP) a incineração à 550°C, de Lodo parcialmente seco, apresentou como resultado uma quantidade de resíduo de 8%. A incineração a 950 °C apresentou uma perda de 3% dos materiais em relação a 550 °C.

Na ETE IAPI, de Porto Alegre, o resíduo fixo, que é o material não volátil a 550°C, foi de 9,98% do total. Após esta incineração o material foi novamente levado ao forno a uma temperatura de 950°C, reduzindo em 2,7% o material residual em relação à temperatura anterior, isto é, passando para 9,91% o valor de material residual.

GEYER, RECENA e SCHULER, 1995 também incineraram amostras de Lodos secos, isto é, aqueles obtidos através de secagem em estufa. As amostras foram ensaiadas à 550°C e os resíduos restantes são apresentados na TABELA 3.6.

TABELA 3.6 Resíduos obtidos na incineração a 550°C de Lodo 100% seco (GEYER, RECENA e SHULER, 1995)

	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>
<b>Quantidade incinerada (g)</b>	44,23g	35,18g
<b>Resíduo resultante(g)</b>	14,30g	11,83g
<b>Percentual volatizado (%)</b>	67,67 %	66,36%
<b>Percentual resultante (%)</b>	32,33%	33,64%

Ressalta-se que como o Lodo submetido a esta incineração foi seco em estufa até que atingisse a constância de massa, os percentuais de materiais residuais da incineração foram superiores aos obtidos anteriormente na ETE IAPI. Os percentuais de resíduos não voláteis obtidos foram de 32,33% na amostra 1 e 33,64% na amostra 2, isto é, superiores aos percentuais obtidos na outra análise, que foram de 9,98% a 550°C e 9,91% a 950°C.

### 3.1.3 Difractometria de raios x

Não são encontrados na bibliografia sobre Lodos Sanitários ou cinzas de Lodos Sanitários estudos que tenham utilizado, na caracterização dos materiais, ensaios de difração de Raios X.

Dentro do programa de doutoramento em engenharia civil da UFRGS, GEYER, RECENA e SCHULER (1995) realizaram Difractometria de Raios X em amostras de Lodo incinerado à 550 °C da ETE IAPI, na qual identificaram os seguintes principais compostos

- SiO<sub>2</sub>, na forma de quartzo, sendo o mais presente;
- CaSO<sub>4</sub>, anidrita (gesso), em menor quantidade;
- Mg<sub>3</sub> Si<sub>4</sub> O<sub>10</sub> (OH)<sub>2</sub>, talco, poucos indícios.

Na FIGURA 3.1 apresenta-se o difratograma realizado.



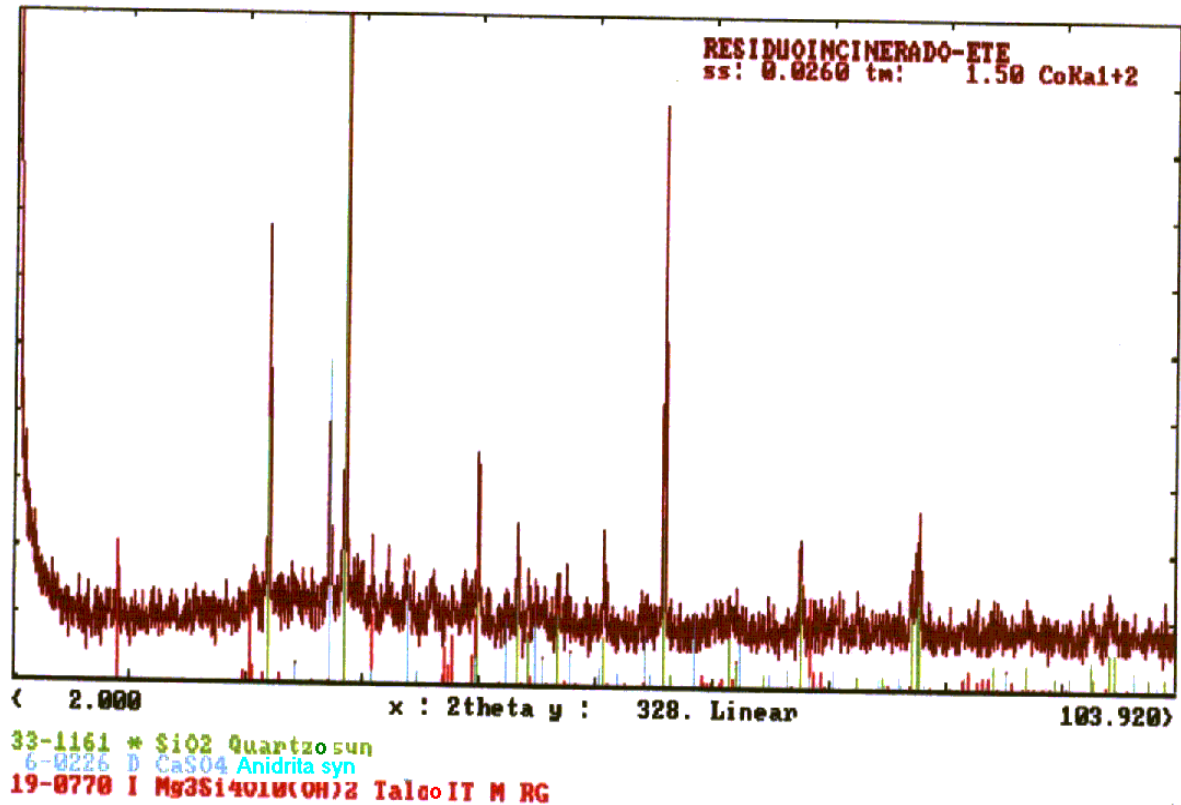


FIGURA 3.1. Difratoograma de Raios X na Cinza do Lodo obtida 550 °C, proveniente da ETE IAPI (GEYER, RECENA e SCHULER, 1995)

Conforme GEYER, RECENA e SCHULER (1995), na incineração muitos compostos, tipo argilas, óxidos e sais, podem ter sido destruídos e novos compostos se formaram em função disto.

A sílica, na forma cristalina do quartzo, pode ter mudado sua morfologia em função do calor. Demais compostos podem estar presentes, e inclusive em abundância, mas em uma forma amorfa que não foi possível identificar por meio desta análise.

### 3.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A fim de se conhecer a morfologia das partículas que compõem o resíduo do Lodo incinerado e a microestrutura do material, procedeu-se a uma análise em microscópio eletrônico de varredura por elétrons secundários (KESTENBACH e BOTA FILHO, 1989), das cinzas do Lodo incinerado à 550°C. Este tipo de análise permite visualizar, em três dimensões, o aspecto do material, em aumentos de até 20000 vezes. No caso do material em estudo, o resíduo incinerado foi usado no ensaio sem ser peneirado (GEYER, RECENA e SCHULER 1995). Nas Fotos 3.1 a 3.4 apresentam-se detalhes registrados em diversas ampliações.

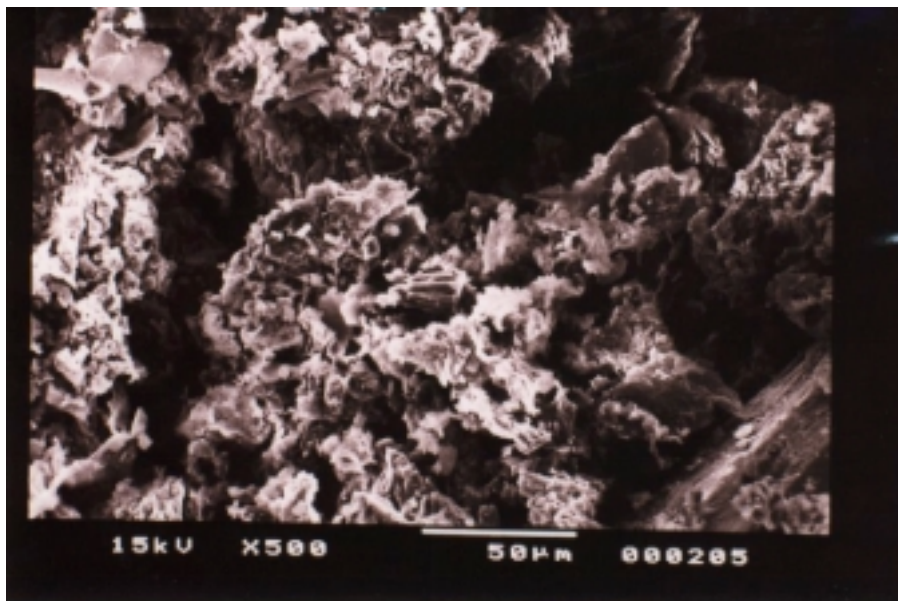


FOTO 3.1 Microscopia eletrônica de varredura do Lodo incinerado à 550 °C da ETE com ampliação de 500 vezes

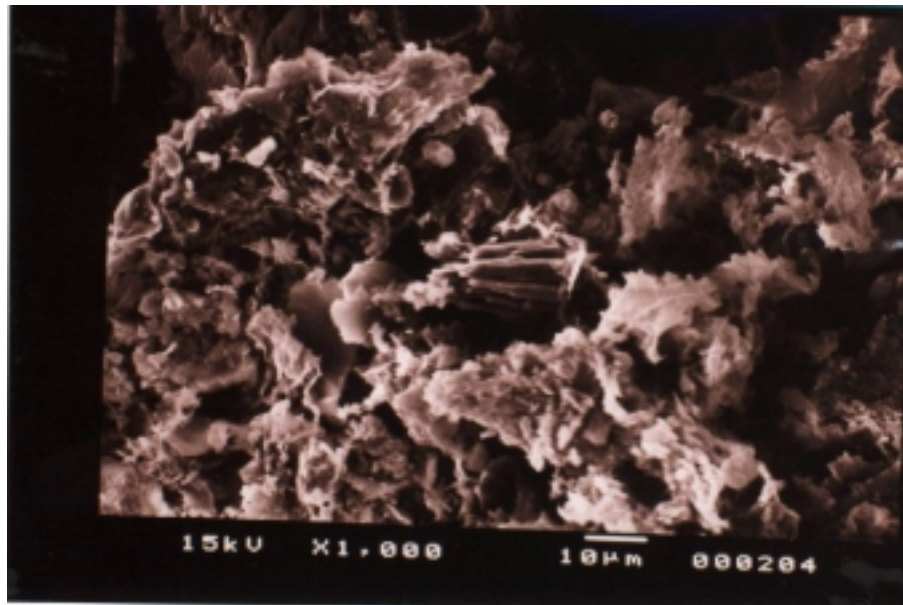


FOTO 3.2 Microscopia eletrônica de varredura do Lodo incinerado à 550 °C da ETE com ampliação de 1000 vezes.

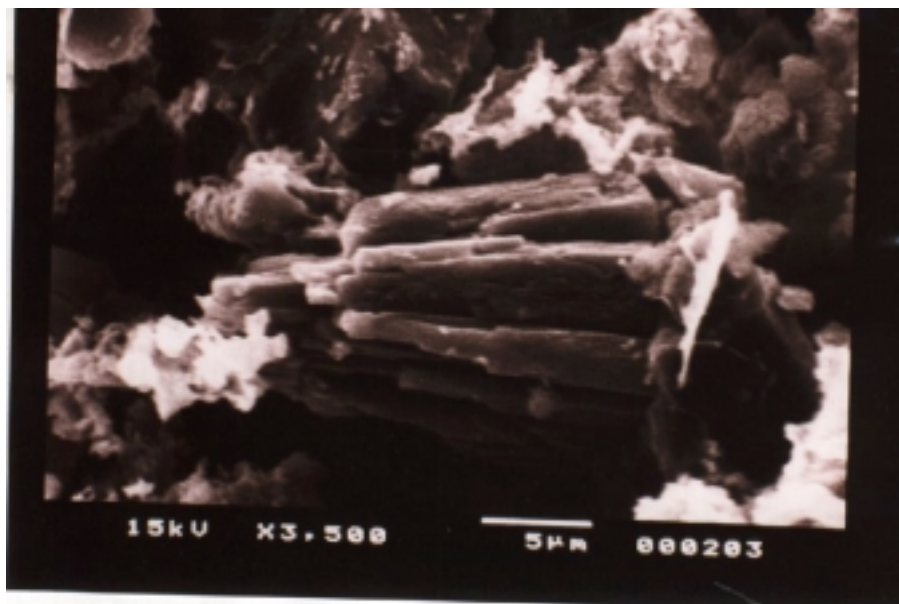


FOTO 3.3 Microscopia eletrônica de varredura do Lodo incinerado à 550 °C da ETE com ampliação de 3500 vezes

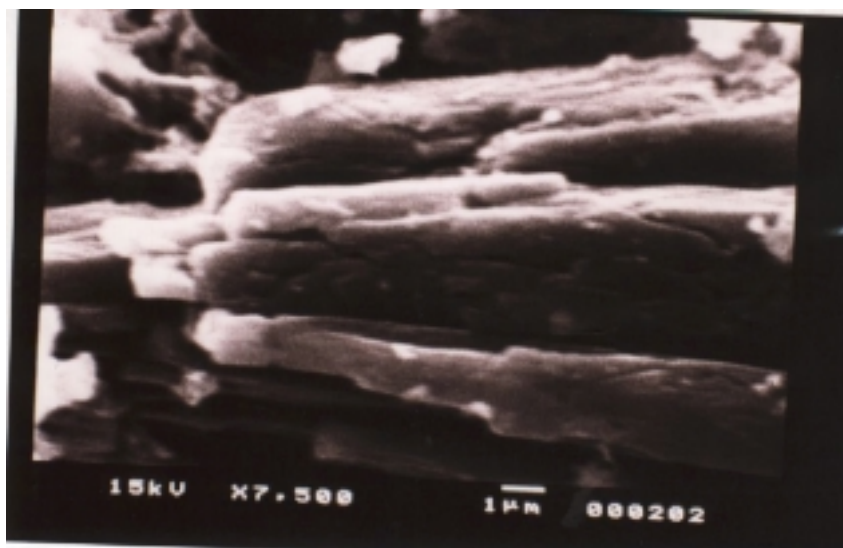


FOTO 3.4 Microscopia eletrônica de varredura do Lodo incinerado à 550 °C da ETE com ampliação de 7500 vezes.

Do que foi observado, pode-se dizer que o material é composto por muitas partículas angulares e junto a estas uma espécie de pó, que pode ser tanto um aglomerado de partículas menores como serem partículas grandes mas muito fraturadas e irregulares.

Conforme GEYER, RECENA e SHULER (1995), estas partículas angulares podem ser associadas à presença de quartzo e outros compostos cristalinos que foram constatados na difratometria de raios X. O fato destes cristais, de dimensões de 10 a 50 micrômetros, estarem fissurados, pode ter sido devido à incineração e posterior resfriamento, algumas vezes brusco, realizado com retirada do material ainda a elevadas temperaturas (200°C) do forno. Nestas condições pode ter ocorrido um choque térmico nos materiais, provocando nestes fissuras e fraturas.

Estes compostos não possuem formas homogêneas: alguns apresentam-se como um aglomerado de “palitos”, outros possuem simplesmente faces retas mas seção indefinida, às vezes sendo apenas um fragmento de prisma. Algumas partículas maiores podem ser identificadas, sem formas definidas, podendo estar associadas a grãos de areia. No geral, pode-se dizer que o material apresenta-se como partículas de formas indefinidas e nos mais variados tamanhos.

### 3.1.5 Determinação da Superfície Específica

Alguns pesquisadores investigaram a granulometria e massa específica da cinza de Lodo Sanitário com o objetivo de verificar as possibilidades de sua aproveitamento como insumo na produção de materiais de construção, porém nenhum resultado de experimento quanto à superfície específica das cinzas foi divulgado por estes (TAY e SHOW, 1987 e KHANBIVARDI e AFSHARI, 1995).

GEYER, DAL MOLIN e CONSOLI (1998) realizaram ensaio com as cinzas do material incinerado proveniente da ETE IAPI da Cidade de Porto Alegre, obtido à 550°C, para determinação da superfície específica, conforme NBR 7224 (ABNT, 1984). Para execução do ensaio foi utilizado o “Permeabilímetro de Blaine” e obtida como superfície específica do Lodo o valor de 164,48 m<sup>2</sup>/kg.

### 3.1.6 Classificação geotécnica e propriedades índices

GEYER, DAL MOLIN e CONSOLI (1998) apresentaram análise de peneiramento mecânico e medições hidrométricas das cinzas do Lodo incinerado à 550°C. Os autores observaram não existirem informações na literatura quanto a estes aspectos e estas poderiam ser úteis nos estudos de aproveitamento do resíduo.

A FIGURA 3.2 mostra a curva de distribuição granulométrica.

O material contém aproximadamente 20% de finos (partículas menores que 74 microns) e menos de 5% de partículas de argila (menores que 2 microns).

Os coeficientes de curvatura e uniformidade, C<sub>c</sub> e C<sub>u</sub>, que foram calculados de acordo com procedimentos da USCS (Unified Soil Classification System) apresentaram os valores médios de C<sub>c</sub>=1.3 e C<sub>u</sub>=32. Desta análise, segundo a norma pode-se definir a cinza como não uniforme e material bem classificado.

Ensaio de Limite de Atterberg foi realizado, sendo constatado que o material não é plástico.

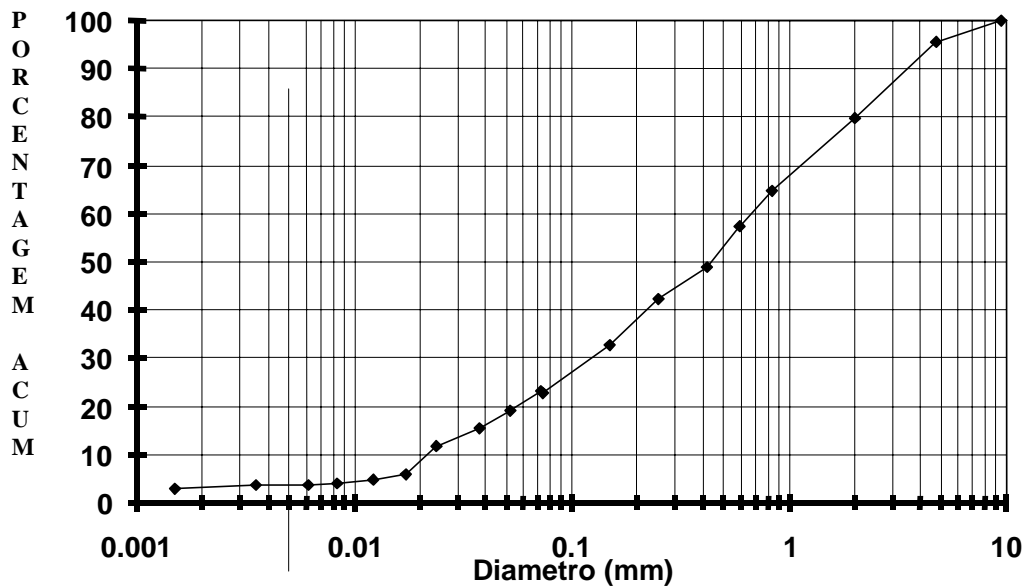


FIGURA 3.2 Análise de tamanho de grãos da cinza

Com os resultados da análise granulométrica e limite de Atterberg pode-se classificar o material como SM, areia siltosa (well graded silty sand), de acordo com a USCS.

De acordo com WAGNER (1975), materiais como este, quando compactados, apresentam boa resistência ao cisalhamento, baixa permeabilidade e compressibilidade e boa trabalhabilidade.

A curva de compactação sob energia proctor normal é apresentada na FIGURA 3.3, onde a máxima densidade seca foi  $14.4 \text{ kN/m}^3$  e a umidade ótima 19.6%. A densidade do material compactado é menor que a maioria dos materiais de aterro. Esta pode ser uma vantagem se o aterro for executado sobre solos de baixa capacidade.

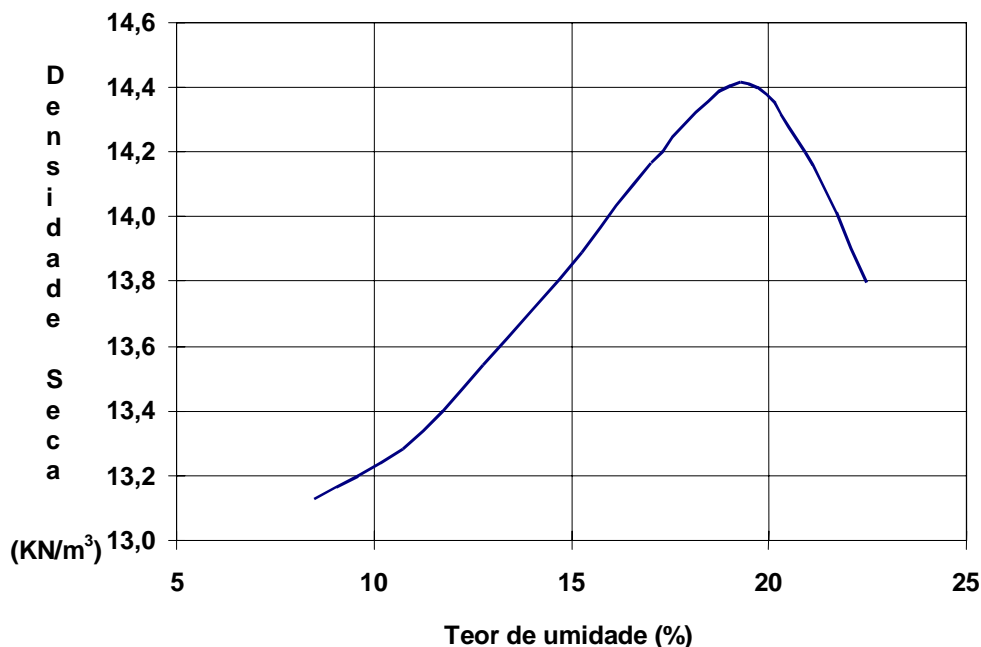


FIGURA 3.3 Curva de compactação para a cinza , densidade seca x conteúdo de umidade.

### 3.1.7 Discussão Sobre as Características dos Lodos

Os Lodos gerados nos diferentes locais de Tratamento de esgotos sanitários apresentam constituições químicas semelhantes, possuindo, no entanto, algumas variáveis, provavelmente devido às coletas e aos tratamentos serem realizados em locais e de formas diferentes.

Os resultados apresentados sobre a ETE IAPI, nas análises químicas efetuadas com o Lodo ao longo de dez anos (1982 a 1992), revelam que o material não tem alterado em muito suas características ao longo do tempo. Este fato é bastante positivo do ponto de vista de viabilização de seu uso como insumo na fabricação de outros materiais.

As análises químicas, tanto do material parcialmente seco como das cinzas, mostraram que o Lodos podem apresentar nas suas constituições compostos nocivos. Materiais como o cromo, mercúrio e chumbo, que em algumas Cinzas de Lodos se

apresentaram em teores superiores aos permitidos (EPA, 1983 e ABNT, 1987) indicando a necessidade de estabilização segura deste resíduo.

Dos demais compostos pode-se destacar a presença de um teor elevado de dióxido de silício, que foi identificado em elevados teores em todas as cinzas, tanto as incineradas a 550°C como a 800 °C. Os teores de silício, cálcio, ferro e alumínio podem indicar, já preliminarmente, uma eventual reatividade do material, sob o ponto de vista de aproveitamento como material cimentante ou pozolânico na produção de concretos ou argamassas..

Analisando alguns materiais utilizados como adições minerais em concretos e argamassas, apresentados por MEHTA (1987), MEHTA (1985), MALHOTRA (1994) e McCARTHY et al. (1984), na TABELA 3.7, pode-se observar que existe um potencial grande, com base nas análises químicas das cinzas de Lodo, para aproveitamento destas como adição na produção de materiais de construção e em especial, devido à semelhança de constituição química, com as adições minerais utilizadas em concretos.

TABELA 3.7 Análise química de típicos materiais pozolânicos, naturais e subprodutos (MEHTA, 1987; MEHTA, 1985; MALHOTRA, 1994 e McCARTHY et al., 1984).

Material	Composição química (%)						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Alcalinos	SO <sub>3</sub>
Turfa Romana, Itália	44,7	18,9	10,1	10,3	4,4	6,7	-
Terra, Alemanha	53,0	16,0	6,0	7,0	3,0	6,0	-
Terra, Grécia	65,1	14,5	5,5	3,0	1,1	6,5	-
Pedra Pome Jalisco, México	68,7	14,8	2,3	-	0,5	9,3	-
Terra diatomácea, Califórnia	86,0	2,3	1,8	-	0,6	0,4	-
Cinza Volante, EUA	55,1	21,1	5,2	6,7	1,6	2,97	0,5
Cinza Volante, EUA	50,9	25,3	8,4	2,4	1,0	3,11	0,3
Cinza Volante, Canadá	48,0	21,5	10,6	6,7	0,96	1,42	0,52
Cinza Volante, Canadá	47,10	23,0	20,4	1,21	1,17	3,7	0,67
Média dos valores da Cinza de Lodo Sanitário (WIEBUSH et al,1998)	52,25	14,26	6,03	10,21	1,48	-	-

Entretanto o Ensaio de pozolanicidade realizado por GEYER, CONSOLI e DAL MOLIN (1998), nas cinzas da ETE IAPI obtidas à 550°C, mostrou ser um material com baixa reatividade, com índice de atividade pozolânica de 58%, Isto pode estar associado à



temperatura de queima ou mesmo à dimensão das partículas, que neste caso foram grandes se comparadas a outras adições pozolânicas usuais ou cimento, com superfície específica de  $164,48 \text{ m}^2/\text{kg}$ . Comparando-se a superfície da cinza com a do Cimento ARI ( $\geq 300 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) (ABNT, 1991) ou com as das escórias de alto forno e cinzas volantes ( $300 \text{ a } 500 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) (MALHOTRA e MEHTA, 1996, entre outros), pode-se considerar que esta cinza apresenta-se com um superfície muito menor que estes materiais, o que pode ter influência diretamente na sua reatividade.

No trabalho realizado pela SABESP e IPT (SANTOS, 1992), é declarado que diferentes temperaturas de queima, a partir de  $500^\circ\text{C}$ , não alteram em muito os compostos que resultam do processo, desde que a variação do teor de cinzas produzidas não ultrapasse 3%. O que sob o ponto de vista químico pode ser comprovado nestas análises apresentadas.

Na difração realizada nas cinzas da ETE IAPI, os compostos identificados correspondem aos elementos identificados na análise química do Lodo. A sílica, que foi identificada na forma de quartzo, está presente como mais da metade do resíduo incinerado a  $550^\circ\text{C}$ . O cálcio, enxofre e magnésio também estão presentes na análise química.

Na microscopia eletrônica de varredura executada por GEYER, RECENA e SCHULER (1995), observou-se que as partículas principais visualizadas são angulares, com superfície planas e eventualmente apresentam-se fraturadas. Pela forma das partículas principais, estas podem estar associadas a grãos de quartzo. Também pode-se visualizar partículas menores depositadas entre as maiores com aparência de pó.

### **3.2 DISPOSIÇÃO FINAL DOS LODOS**

Conforme LUDUVICE et al. (1995), uma visão pragmática obriga a reconhecer que considerando três elementos do nosso planeta: terra, água e ar, os Lodos dos tratamento de efluentes domésticos terão que ser necessariamente dispostos em um deles. Entretanto, é dever dos profissionais de engenharia e meio ambiente e também da sociedade, estudar os efeitos nocivos que a simples disposição destes materiais pode trazer ao meio ambiente,

bem como propor alternativas para uma disposição segura ou mesmo um aproveitamento produtivo destes resíduos.

As principais alternativas para disposição final ou utilização podem ser, de uma forma geral, classificadas como: disposição no solo, que inclui o uso como aterro ou na agricultura; lançamento em rios ou mar, lançamento no ar, ou utilização como subproduto, isto é, aproveitamento do resíduo (JARNIS E VICKRIDGE, 1984).

No caso da última alternativa, a partir da metade da década de 80 é que iniciaram-se as pesquisas visando o aproveitamento do resíduo (ALLEMAN e BERMAN, 1984; KATO e TAKESUE, 1984; TAY, 1987; BHATTY e REIDT, 1989).

Três aspectos tem sido apontados como fundamentais nos estudos para aproveitamento do Lodo sanitário (DMAE, 1996):

- Não causar a poluição do ar ou da água;
- Ser viável economicamente;
- Ser uma solução permanente.

### **3.2.1 Disposição no Solo**

Conforme WEBER (1984), nas Estações de Tratamento de esgoto urbano, o Lodo é um subproduto de disposição final problemática. Entre as alternativas de disposição no solo o autor destaca: os aterros sanitários, as lagoas de armazenagem e o uso agrícola.

A disposição no solo ainda é a alternativa mais utilizada. A utilização em terras reservadas à agricultura, pecuária e o lançamento em aterros sanitários responde pela maior parte dos Lodos gerados.

A utilização de Lodo na agricultura e pecuária é bastante desenvolvida na Europa e América do Norte e até hoje se mantém, principalmente devido aos baixos custos, apesar das restrições quanto aos locais a onde o Lodo pode ser aplicado.

SANTOS (1977) afirma que na década de 70 a disposição dos Lodos na agricultura era a alternativa mais recomendada por diversos países, como Japão e EUA.

Nos últimos anos, no entanto, a disposição de Lodo na agricultura vem sofrendo tendência de queda devido a vários fatores, principalmente pelos danos ambientais e à saúde humana que esta solução tem causado. A necessidade de alto controle, os limites impostos por calendários agrícolas, as políticas governamentais, as regulamentações ambientais e os custos de transporte, têm sido os principais motivos da busca de outras alternativas para disposição do resíduo.

Apesar do valor agrônômico inquestionável, a utilização de Lodos na agricultura deve ser feita de maneira cuidadosa de modo a não provocar danos ao solo, à cultura ou a quem aplica, respeitando-se os limites de utilização (DAVIS, 1989).

Conforme LUDUVICE et al. (1995), os principais efeitos nocivos provocados pelo Lodo, quando utilizado na agricultura, podem ser englobados em duas categorias:

- Risco a saúde humana, animal e vegetal a partir de agentes patogênicos presentes no Lodo;
- Acúmulo de metais pesados ao longo da cadeia alimentar, através da elevação da concentração de metais pesados no solo.

Conforme CHANEY e STEWART (1977), os principais metais pesados que reconhecidamente trazem maiores preocupações quando absorvidos em elevadas quantidades pelas plantas e posteriormente ingeridos pelos animais ou pelo homens são: cromo, mercúrio, chumbo, zinco, cobre, níquel e cádmio. Observam ainda os autores que estes compostos, em maior ou menor quantidade, são comumente encontrados em Lodos Sanitários.

Os metais pesados tornam-se disponíveis às plantas quando se encontram solubilizados na fração líquida do solo, ou seja, na água presente no solo. Desta forma, um solo agrícola pode receber a adição de metais até limites bastante baixos (WALDEMAR, 1992).

Os teores de metais pesados solúveis no solo são geralmente baixos, porém o emprego de Lodo de ETES em aterros ou como adubo pode elevar as concentrações de metais pesados, nos solos, a níveis capazes de causar danos a biota (ANDREOLI, 1999).

Devido aos problemas que pode causar, nos países desenvolvidos a utilização de Lodo bruto tem sido reduzida fortemente, devendo o Lodo ser aplicado estabilizado/digerido através de processos de estabilização.

Nos EUA, restrições impostas (EPA, 1983) limitaram o uso de Lodos provenientes de ETES localizadas em regiões com alto índice de industrialização, pois nestas áreas os Lodos carregam consigo altas taxas de metais pesados, advindos da coleta unitária (mista).

O lançamento em aterros sanitários já foi prática muito popular na Europa até os anos 80 e é até hoje nos países em desenvolvimento. No entanto, as legislações mais recentes sobre o manejo de aterros sanitários tem aumentado consideravelmente as dificuldades desta prática. Conforme CHRISTENSEN (1987), aproximadamente 50% do Lodos gerados são ainda depositados no solo.

### **3.2.2 Disposição em Rios e no Mar**

A disposição final dos Lodos em corpos líquidos pode ser considerada como a mais econômica, porém esta prática tem sido extremamente nociva aos rios e lagos, principalmente àqueles de pequena dimensão ou volume.

Conforme FELICIANO (1981), algumas cidades situadas próximas às costas oceânicas bombeiam os Lodos para o oceano, mas esta alternativa vem sendo muito questionada.

O mar, devido a sua grande dimensão e possível capacidade de depurar grandes quantidades de resíduos, tem sido utilizado como local de deposição dos Lodos. O lançamento ao mar tem sido feito através de tubulações submersas ou por barcaças. No primeiro caso, o Lodo é bombeado diretamente por tubulação através de estações de bombeamento.

Até a década de 70 , quando eram menos considerados os danos ao meio ambiente, esta alternativa era bastante utilizada nos EUA e no Reino Unido, porém a partir de fortes pressões de Organizações Não Governamentais para proteção do meio ambiente contra esta forma de disposição tem-se abandonado esta prática (US- JAPAN CONFERENCE, 1973).

No Brasil, em alguns sistemas sanitários o Lodo úmido é misturado aos esgotos que não são tratados e lançados nos mananciais.

Contaminações de importante baias marítimas no mundo, devido ao lançamento de grandes quantidades e por muito tempo destes resíduos, tem demonstrado que esta alternativa, com o tempo, tende a causar prejuízos irreparáveis ao oceano e vida aquática.

### **3.2.3 Disposição no Ar**

Pelo fato de que no processo de incineração grande parte dos constituintes são volatilizados e portanto exterminados, coloca-se que esta é uma forma de disposição parcial, no ar, dos Lodos Sanitários. Por esta razão, quando da classificação das formas de disposição final a incineração tem sido listada.

Até a década de 80, a incineração não havia sido utilizada em grande escala, mesmo nas cidades com elevado percentual de esgotos tratados. Nos últimos anos, devido a vantagens que o processo traz, tanto do ponto de vista da significativa redução do volume de resíduos como da possibilidade do aproveitamento das cinzas, a incineração tem sido cada vez mais utilizada (OKUNO et al., 1997). A falta de definições quanto as formas de disposição final segura do Lodos, mas é entendimento geral de que a incineração passa cada vez mais a fazer parte do processo.

### **3.2.4 Disposição final através do aproveitamento do resíduo**

Esta forma de disposição, que é objeto deste trabalho, será abordada no Capítulo 4 desta tese.

### **3.2.5 Discussão sobre as tendências de disposição final e utilização dos resíduos**

Onde e como dispor de forma segura os Resíduos Sólidos dos tratamentos de esgotos sanitários tem sido a grande questão ainda não respondida.

As alternativas de disposição final em aterros, agricultura ou o lançamento em mananciais ainda tem sido muito utilizadas. Porém, devido aos problemas ambientais gerados, falta de áreas para estas alternativas e principalmente porque não constituem-se, na sua maioria, em disposições finais seguras, estas alternativas tem sido questionadas.

Conforme KANEZASHI e MURAKAMI ( 1991), no Japão, até a década de 80, 60% dos Lodos gerados no tratamentos de esgotos eram lançados em aterros e na agricultura. Com a crescente urbanização das cidades e aumento das quantidades de esgotos tratados, que já chegaram a 55% da população do país e 75% nas grandes cidades, grande parte das soluções, que vem sendo apontadas nos últimos anos, tem passado pela introdução da incineração no processo de tratamento do Lodo. Este tipo de alternativa somente passou a ser utilizado a partir dos anos 80, porque, com o desenvolvimento de equipamentos modernos foram reduzidas as concentrações de emanações perigosas advindas do processo.

A introdução da incineração no processo de tratamento do Lodo, que ainda não se caracteriza como uma forma de disposição final estável, facilita que esta ocorra, principalmente por ser a Cinza um material com maior potencial de ser aproveitado.

Em levantamento realizado no final da década de 80 , no Japão, verificou-se que do total de Lodos gerados nas plantas de tratamento de esgotos sanitários daquele país, 4,5%

são utilizados na agricultura, 21,6% como aterros e 73,9% dos Lodos são incinerados (KITA ENVIRONMENTAL COOPERATION CENTER, 1995).

Dados da WQI (1994) sobre o Japão mostram que, em 1994, 80% dos Lodos já eram incinerados, observado-se um grande crescimento neste tipo de tratamento dos Lodos. Devido aos avanços ocorridos nas tecnologias de desidratação dos Lodos, o que reduziu significativamente os custos com a incineração, bem como os avanços nas técnicas e equipamentos de incineração, quanto à capacidade de incineração e quanto à retenção de emissões polidoras na atmosfera, esta alternativa tem sido cada vez mais utilizada.

A evolução ao longo dos últimos anos das alternativas de disposição final dos Lodos no Japão é apresentada na TABELA 3.8.

TABELA 3.8 Evolução dos métodos de disposição final dos Lodos no Japão (KITA ENVIRONMENTAL COOPERATION CENTER, 1995)

<b>Ano</b>	<b>Quantidade de Lodo úmido/dia em 1000t.</b>	<b>Uso na agricultura (%)</b>	<b>Uso em aterros não controlados (%)</b>	<b>Incineração (%)</b>
1985	113,8	26,4	3,0	70,6
1986	117,7	24,6	3,5	71,9
1987	122,8	23,4	4,0	72,6
1988	128,6	23,0	4,2	72,8
1989	133,1	21,6	4,5	73,9
1994	160,0	14,0	6,0	80,0

Nos EUA estima-se que 30% dos Lodos produzidos sejam incinerados e destes, 100% são aproveitados como subproduto para produção de algum material (WATER QUALITY INTERNATIONAL, 1992)

Observa-se uma tendência também nos países europeus de utilizarem a incineração como forma de tratamento dos Lodos e mesmo para possíveis aproveitamentos do material (BHATTY e REID, 1989).

Na Europa, considerando que até o início da década de 80 a incineração não era utilizada, o fato de já serem submetidos a este processo cerca de 10% do total de Lodos

gerados mostra uma forte tendência tecnológica. A TABELA 3.9 (WATER QUALITY INTERNATIONAL, 1992) mostra que em alguns países como Áustria, Dinamarca e Suíça este percentual já era acima de 20%.

Na Alemanha, dados de 1996 mostram que o percentual de Lodos incinerados já era de 15% e em crescimento (WIEBUSCH, 1998).

TABELA 3.9 Disposição final de Lodos na Europa. (WATER QUALITY INTERNATIONAL, 1992)

PAÍS	QUANTIDADE DE LODO ton. X1000/ano	DISPOSIÇÃO NA AGRICULTURA (%)	DISPOSIÇÃO EM ATERROS (%)	INCINERAÇÃO (%)	OUTRAS FORMAS (%)
ÁUSTRIA	320	13	56	31	0
BÉLGICA	75	31	56	9	4
DINAMARCA	130	37	33	28	2
FRANÇA	700	50	50	0	0
ALEMANHA	2500	25	63	12	0
GRÉCIA	15	3	97	0	0
IRLANDA	24	28	18	0	54
ITÁLIA	800	34	55	11	0
LUXEMBURGO	15	81	18	0	1
HOLANDA	282	44	53	3	0
PORTUGAL	200	80	13	0	7
ESPANHA	280	10	50	10	30
SUÍÇA	215	60	30	20	0
INGLATERRA	1075	51	16	5	28
<b>Totais</b>	<b>6631</b>	<b>38 %</b>	<b>43%</b>	<b>10%</b>	<b>9%</b>

A TABELA 3.10 mostra um comparativo dos principais meios de disposição de Lodos em países desenvolvidos e também no Brasil.

TABELA 3.10 Disposição dos Lodos (WATER QUALITY INTERNATIONAL, 1992)

DISPOSIÇÃO FINAL	AGRICULTURA	ATERROS	INCINERAÇÃO	OUTROS
EUROPA	38%	43%	10%	9%
JAPÃO	10%	6%	80%	4%
EUA	20%	30%	30%	20%
BRASIL	5%	80%	-	15%



No caso do Brasil, deve-se dizer em primeiro lugar que o tratamento de esgotos sanitários ainda é realizado em percentuais muito baixos. Conforme BIO (1997), em 1996 este percentual era de 11,31%.

Os dados fornecidos pela TABELA 3.10 mostram que em um país desenvolvido, em cujas áreas livres para disposição de resíduos são muito restritas, como é o caso do Japão, o percentual de incineração de Lodos Sanitários vem crescendo anualmente e já estando na ordem de 80% .

Na TABELA 3.10 pode-se observar que a incineração de Lodos, na Europa, no início dos anos 90 passou a ser percentualmente representativa, chegando a uma média de 10%, e em países como a Suíça, Áustria e Dinamarca na ordem de 20 a 30%.

Embora as questões de falta de área para disposição final parecem estar ligadas àqueles países com pequena extensão territorial, cabe ressaltar que nos países com grandes áreas, sejam eles desenvolvidos ou não, nas suas grandes metrópoles também não existem espaços para disposição destes resíduos. A alternativa de incineração dos Lodos tem então se apresentado com o maior crescimento, independente do país ou da área deste.

Outra questão importante é a de que com a incineração se reduz significativamente o volume de resíduo, mas não se elimina-o totalmente. Podendo-se dizer que ao incinerar aumenta-se a concentração de compostos poluentes, principalmente dos metais. Decorre disto a necessidade de dispor de forma segura as Cinzas geradas.

A disposição final segura dos Lodos, portanto, não encontra na incineração sua última etapa. A estabilização das Cinzas geradas passa a ser o problema, e neste sentido o aproveitamento destes resíduos, em especial na construção civil, tem sido apontado como uma das alternativas possíveis para utilização destas cinzas.

Estabelecida a incineração no processo de Tratamento passaram a ser desenvolvidas pesquisas para aproveitamento das cinzas geradas como subproduto, na construção, na fabricação de materiais de construção (OKUNO e TAKAHASHI, 1997; TAY e SHOW, 1997).

#### **4 UTILIZAÇÃO DOS LODOS COMO INSUMO NA ENGENHARIA CIVIL**

A proposição de aproveitamento do Lodo de esgotos domésticos na produção de insumos para a construção civil surgiu da dificuldade que as grandes cidades, principalmente em países desenvolvidos, passaram a enfrentar em dar um destino final aos Lodos gerados, advinda do aumento do tratamento dos esgotos sanitários e, por conseguinte, crescimento do volume de Lodos.

O elevado volume de Lodos gerados em grandes centros urbanos passou a ser um problema, além do ponto de vista ambiental, também quanto às áreas para sua disposição final. A tradicional disposição em aterros sanitários passou a ser limitada pela falta de áreas próximas disponíveis e devido aos riscos de contaminações.

GIDLEY e SACK (1983) afirmam que grande variedade de resíduos urbanos, entre eles os resíduos de esgotos sanitários e de lixos apresentam, desde que beneficiados por algum processo, potencialidades de serem utilizados como subprodutos na Indústria da Construção Civil.

Inúmeros resíduos tem sido utilizados como subproduto na indústria da construção, com bastante sucesso. Entre eles pode-se apontar a escória de alto-forno, a casca de arroz, a cinza de casca de arroz, a cinza volante, a fibra de coco e a fibra de sisal (SWAMY et al., 1986; MALHOTRA et al., 1987; CONCOTO, 1990; MEHTA e MONTEIRO, 1994; MALHOTRA e MEHTA, 1996, AGOPYAN, 2000, SWAMY, 2000, entre outros).

Isto pode ser observado, por exemplo, nos cimentos produzidos, que na sua maioria contém resíduos ou sub produtos, o que também ocorre com muitos concretos e argamassas. Este aspecto, relacionado com o fato de que estes materiais são produzidos em grande quantidade, os transformam nos materiais de construção com maior potencial para absorver resíduos.

Alguns subprodutos já são considerados como inseparáveis dos processos produtivos, devido às vantagens que os seus usos trazem, como por exemplo são os casos das escórias de alto forno e das cinzas volantes na produção dos cimentos de alto forno e

pozolânicos. Também a sílica ativa, que é um resíduo da produção do silício metálico, tem sido cada vez mais utilizada como adição ao concreto, contribuindo com seu alto desempenho ou alta resistência.

ALLEMAN, BERMAN e PROUTY (1983) discutiram a questão da solidificação, o encapsulamento e a estabilização de resíduos industriais através da sua utilização na produção de cimentos e tijolos. No caso da utilização de resíduos como adição aos concretos ou materiais cimentantes, a fixação, microencapsulação e macroencapsulação ocorrem por processos químicos onde os resíduos supostamente reagem com os materiais e os compostos não reagentes são “enjaquetados” pela matriz formada. No caso da utilização dos resíduos em tijolos ou cerâmicas, a estabilização e fixação ocorre pelo processo térmico, isto é, através das altas temperaturas de queima os resíduos são incorporados na matriz formada.

Os primeiros estudos para a utilização de Lodos de ETES como subproduto na engenharia civil foram quanto ao aproveitamento como insumo para produção de materiais cerâmicos (ALLEMAN e BERMAN, 1984).

A produção de materiais cerâmicos, menos nobres como tijolos, tem sido uma das alternativas para o uso de diversos resíduos industriais, e mais recentemente também para resíduos do tratamento dos esgotos sanitários (SAITO, 1994).

Os pisos cerâmicos vermelhos, as lajotas e principalmente os tijolos comuns são materiais de composição simples, geralmente executados com tecnologias pouco sofisticadas e executados a partir de argilas não muito puras, e por esta razão passíveis de receberem adições de materiais na sua execução. Também o concreto é um material que, por utilizar insumos e processos produtivos não muito complexos, apresenta potencial para receber resíduos (TAY e SHOW, 1991).

COSTA E FERREIRA (1986) avaliaram a possibilidade de introdução de Lodos provenientes dos tratamento de esgotos industriais, contendo metais pesados, em tijolos de cerâmica. Os resultados obtidos pelos autores, após inúmeros experimentos realizados em cerca de dois anos de pesquisa, apontaram pela viabilidade de introdução destes resíduos na fabricação de tijolos. Os resultados de testes físicos e químicos mostraram que não são necessárias restrições ao uso deste tipo de tijolo, uma vez que os metais presentes, devido

ao emprego do calor, passaram para uma forma menos solúvel e foram fixados nas matrizes.

Conforme WIEBUSCH et al.(1998), embora ainda não haja uma utilização em larga escala dos Lodos Sanitários pela Indústria, como material reciclado para a construção civil, exemplos como o do Japão onde 10% dos Lodos já são aproveitados nesta indústria e da Alemanha, onde se vê os primeiros passos para isto, demonstram a importância desta alternativa ser melhor estudada.

A discussão sobre o aproveitamento se estabelece em como fazê-la de forma segura e que não afete o meio ambiente. Outro ponto, é quanto ao aproveitamento do material, que na Suíça é entendido de duas formas: ou como combustível, nos fornos da indústria do cimento ou cerâmica, ou como insumo na produção destes materiais.

O uso do Lodo parcialmente seco, gerado na Suíça, como combustível tem se apresentado problemático porque a maioria das indústrias de cimento não estão preparadas para controlar as emissões de gases produzidos pela queima deste tipo de combustível e os custos para adaptá-las seriam elevados (MULLER, 1995).

Conforme MULLER (1995), a disposição final dos resíduos de estações de tratamento de esgotos sanitários tem sido alvo de inúmeros estudos, os quais na sua maioria tem apontado preferencialmente pelo aproveitamento do Lodo Incinerado, como insumo.

Testes de solubilização com resíduos sólidos urbanos orgânicos, provenientes de coletas seletivas, incinerados e adicionados a concretos, em substituição de 20% do cimento, mostram que a água lixiviada nestes concretos apresenta-se dentro dos padrões de potabilidade, ou seja, a mistura do concreto com as cinzas estabilizou o resíduo, conforme pode ser observado na TABELA 4.1 (COLLINS, 1977). Esta alternativa de disposição final poderia, segundo o autor, ser aplicada a outros resíduos cujas características fossem de alto teor de matéria orgânica na sua composição, como é o caso do Lodo.

TABELA 4.1 Resultados do ensaio de Solubilização por 48h (COLLINS, 1977)

<b>Característica do líquido lixiviado</b>	<b>Cinzas de Lixo (mg/l)</b>	<b>Concreto (mg/l)</b>	<b>Água potável (mg/l) padrões do U.S. Public Health Service</b>
PH	7,9	10,7	-
SO <sub>3</sub>	970	70	250
Cl	690	110	250
Al	0,6	9,8	-
As	0,002	0,002	0,1
Cd	0,02	0,1	0,1
Cr	0,05	0,5	0,5
Cu	0,07	0,1	1,0
Fe	0,1	0,1	0,3
Hg	0,002	0,002	-
Pb	0,5	0,5	0,5
Zn	0,4	0,2	5,0

Na TABELA 4.1 pode-se observar que quando as cinzas de lixo, que são resíduos perigosos, são adicionadas ao concreto, estas ficam estabilizadas neste. Os níveis dos compostos nocivos no estrato da solubilização (líquido solubilizado) de concreto não se apresentam perigosos, estando abaixo do máximo permitido.

BENSON et al. (1985) estudaram a disposição final de um resíduo industrial perigoso, com alto teor de cádmio, como adição ao concreto. Como conclusões do trabalho demonstraram que adições até 15% da massa do cimento reduzem um pouco a resistência do concreto, o que pode ser contornado alterando-se a relação água/cimento (a/c). Quanto ao aspecto ambiental concluíram, com base no ensaio “ EP toxicity extartion procedure”, que enquanto o resíduo continha livre 17,1mg/l de cádmio, o concreto com 15% de adição continha somente 0,1mg/l de cádmio livre. Baseados nos testes realizados, os autores concluíram que o concreto fixa o material poluente em sua matriz, podendo ser um meio seguro de disposição deste resíduo.

Estes resultados indicam a viabilidade de que sejam testados outros resíduos como o Lodo Sanitário.

Quanto ao aspecto ambiental da utilização do Lodo ou sua Cinza na produção de materiais de construção, vários autores (COLLINS, 1977; ALLEMAN, BERMAN e

PROUTY, 1983 e BENSON et al., 1989), estudando resíduos sólidos urbanos, adicionados a concretos, observaram existir a possibilidade da estabilização do resíduo, porém neste campo, nenhum estudo específico foi realizado com o Lodo Sanitário.

#### **4.1 LODO COMO INSUMO NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS**

No que se refere ao uso dos Lodos como insumo na fabricação de tijolos e similares, a literatura tem apontado duas alternativas: a primeira consiste em adicionar aos materiais de produção de tijolos o Lodo parcialmente desidratado e a segunda a de adicionar a Cinza proveniente da incineração do Lodo (ALLEMAN e BERMAN, 1984; TAY, 1987; TRAUNER, 1991 e WIESBUSCH e SEYFRIED, 1997).

Tradicionalmente tem-se adicionado nas argilas para produção de tijolos outros materiais, alguns visando aumentar da resistência ou melhorar a aparência do material, outros visando baixar o custo de produção. Substâncias inertes como areias tem sido comumente utilizadas para reduzir as fissuras por retração oriunda da queima dos tijolos. Outros materiais como as substâncias orgânicas ou resíduos orgânicos como restos de óleos, tem sido usados para reduzir a energia gasta nas operações de queima dos tijolos (TRAUNER, 1991).

##### **4.1.1 Confecção de tijolos com Lodo parcialmente desidratado**

Buscando conciliar um problema ambiental que é a disposição final dos Lodos com a produção de algum material, ALLEMAN e BERMAN (1984), nos Estados Unidos, propuseram a execução de tijolos com adição de Lodo Sanitário na mistura.

Uma grande variedade de Lodos de estações de tratamento de esgotos da cidade de Washington e outras localidades americanas próximas foi empregada.

Os Lodos apresentavam-se parcialmente secos, isto é, com quantidades de sólidos variando entre 15 a 25%.

Estes Lodos foram adicionados às argilas comumente utilizadas na produção de tijolos na região, numa proporção volumétrica de até 50% de Lodo.

A produção dos tijolos a partir destas misturas se deu seguindo-se os mesmos passos e técnicas adotadas para a produção dos tijolos sem adições.

Tendo em vista a grande gama de materiais que são adicionados à produção dos tijolos e os bons resultados obtidos, parece ser plausível a incorporação de Lodos na produção destes materiais. Porém, segundo ALLEMAN e BERMAN (1984), estudos adicionais como técnico-econômicos e ambientais ainda são necessários para que esta alternativa se torne definitiva.

Diversos experimentos foram realizados, os tijolos produzidos foram submetidos à avaliação com base nas normas da ASTM, nos seguintes requisitos: estética, resistência a compressão simples, absorção de água e gelo e degelo.

A TABELA 4.2 mostra os resultados de um dos experimentos onde são comparados tijolos executados com diferentes quantidades de Lodos adicionados e o tijolo regular sem adição.

TABELA 4.2 Análise do tijolo executado com Lodo seco (ALLEMAN e BERMAN 1984)

<b>Tijolo</b>	<b>estética</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Absorção de água a 24 h</b>	<b>Absorção de água quente a 5h</b>
<b>Com 15% de Lodo</b>	excelente	4,57	-	-
<b>Com 30% de Lodo</b>	boa	4,31	6,1%	11,5%
<b>Com 50% de Lodo</b>	regular	4,40	6,5%	9,3%
<b>Sem adição</b>	excelente	6,05	5,1%	5,1%

Conforme ALLEMAN e BERMAN (1984), nos primeiros testes realizados os tijolos apresentavam aparência bastante similar aos tijolos convencionais, e só podiam ser distinguidos destes, antes da queima, pelo cheiro.

Os resultados dos testes com os novos tijolos mostraram que há uma redução de resistência à compressão com o acréscimo de Lodo na mistura. Observou-se que em testes de absorção de água, que os tijolos feitos com adição de Lodos absorvem mais água que os tradicionais, o que levou o pesquisadores a conclusão de que há uma maior formação de vazios que no caso de tijolos produzidos só com argilas.

Quanto à estética dos tijolos observou-se que desde que a produção fosse controlada os tijolos apresentavam boa aparência ao comparar-se com os tijolos tradicionais.

ALLEMAN e BERMAN (1984) concluíram com estes experimentos que a adição de Lodo parcialmente seco para produção de tijolos só é recomendável até limites de 30% em volume.

Os experimentos realizados mostraram ser possível a execução de tijolos a partir da adição de Lodos no estado natural. Os experimentos realizados por ALLEMAN e BERMAN (1984) foram tão significativos do ponto de vista científico que a partir deles criou-se a denominação de Biobrick , tijolos biológicos, para este tipo de novo material.

TAY (1987), em Singapura, seguindo os passos de ALLEMAN e BERMAN (1984), realizou experiências para utilização dos Lodos como insumo para fabricação de tijolos. Observando que embora os resultados anteriores tenham sido positivos, o uso desta alternativa não havia se consolidado, o pesquisador resolveu repetir os ensaios realizados.

Lodos digeridos, estabilizados organicamente foram recolhidos em estações de tratamento de esgotos, após serem parcialmente desidratados em processo de centrifugação. Paralelamente foram coletadas amostras de argilas utilizadas pelas empresas fabricantes de tijolos locais.

Os experimentos realizados por TAY (1987) consistiram em primeiro utilizar os Lodos parcialmente desidratados nas proporções em massa de 10%, 20%, 30% e 40%, misturados com a argila para produção dos tijolos. Os resultados obtidos são apresentados na TABELA 4.3.



TABELA 4.3 Propriedades dos tijolos executados com Lodo in natura (TAY, 1987)

<b>Tijolo de Lodo "in natura" de Lodo)</b>	<b>Massa específica (tn/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência a compressão (MPa)</b>	<b>Absorção de água (%)</b>	<b>Fissuras por secagem queima dos tijolos (%)</b>
<b>0%</b>	2,38	8,72	0,03	9,91
<b>10%</b>	2,32	5,99	0,74	10,15
<b>20%</b>	2,24	4,59	1,37	10,84
<b>30%</b>	2,17	3,95	2,58	12,26
<b>40%</b>	1,98	3,79	3,63	12,87

Observa-se que com o acréscimo de Lodo, os tijolos passaram a perder qualidade sob o ponto de vista de massa específica, resistência à compressão e absorção de água.

TAY (1987) concluiu que os tijolos executados com Lodo parcialmente desidratado apresentavam uma textura pobre, pouco regular, o que impede a sua utilização em alvenarias aparentes. Os resultados obtidos por TAY (1987), em termos de resistência à compressão foram menores que os de ALLEMAN e BERMAN (1984)

As experiências com o uso de Lodo parcialmente desidratado na fabricação de tijolos foram positivas, porém a definitiva implantação deste tipo de tecnologia na produção industrial ainda esta longe, porque são inúmeros os fatores envolvidos. Os problemas sociais, quanto ao preconceito de utilizar um tijolo fabricado a partir de resíduos de esgotos, ou mesmo, dos fabricantes em manusear este resíduo, ainda são problemas a serem resolvidos.

No caso, por exemplo, de locais com abundância de argilas de boa qualidade, adições de outros materiais no processo implicam em mudanças no processo de produção e o que pode trazer aumentos dos custos envolvidos. Esta também tem sido uma das razões para alguma rejeição desta tecnologia.

Outro ponto importante, ainda não totalmente esclarecido na utilização do Lodo na fabricação de tijolos é o de cunho ambiental, ou seja, no que se refere as emissões de gases, advindas da queima dos Lodos. As indústrias não estão preparadas para seu controle e esta adaptação nem sempre se mostra fácil de ser realizada.

Não obstante aos vários aspectos já citados, que se impõem ao uso do Lodo parcialmente seco na produção de tijolos, faltam também estudos que verifiquem a estabilização ou fixação segura do resíduo nos materiais cerâmicos.

#### 4.1.2 Condeção de tijolos com Lodo Incinerado

TAY (1987) propôs uma outra forma de aproveitamento dos resíduos de ETES na fabricação de tijolos, que foi a de utilizar as cinzas do material incinerado ao invés do Lodo parcialmente seco.

Estes experimentos consistiram da utilização de cinzas, provenientes da incineração de Lodos, à temperaturas de 600°C, misturadas nas proporções em massa de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% na argila.

TAY (1987) avaliou as propriedades mecânicas e físicas dos produtos, conforme mostram as TABELA 4.4.

TABELA 4.4 - Propriedades dos tijolos executados com cinzas Lodo (TAY, 1987)

<b>Tijolo com cinza de Lodo de cinza (%)</b>	<b>Massa específico (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência a compressão (MPa)</b>	<b>Absorção de água (%)</b>	<b>Fissuras por secagem na queima dos tijolos (%)</b>
<b>0</b>	2,38	8,72	0,03	9,91
<b>10</b>	2,42	8,57	0,07	9,55
<b>20</b>	2,46	8,00	0,11	9,10
<b>30</b>	2,50	7,07	1,39	9,36
<b>40</b>	2,55	7,05	1,52	9,79
<b>50</b>	2,58	6,69	1,70	10,51

Os resultados mostraram que o massa específica dos tijolos executados com a cinza foi maior que os executados com Lodo parcialmente seco e inclusive um pouco superior que o tijolo convencional. Os tijolos com Lodo parcialmente seco apresentaram massa

específica média de 2,17, enquanto o convencional foi de 2,38 e o do executado com cinzas foi 2,50.

Conforme TAY (1987), os tijolos executados com cinzas de Lodo, em comparação com os executados com o Lodo natural seco apresentaram inúmeras vantagens. Antes de mencionar-se as vantagens técnicas deve-se atentar para o fato que o processo de incineração dos Lodos produz um resíduo muito mais higiênico e seco e portanto mais fácil de ser trabalhado e aceito pelas indústrias como insumo.

As resistências à compressão dos tijolos executados tanto com Lodo parcialmente seco como o com cinza atenderam as normas, porém os tijolos com adição de cinza apresentam muito melhor desempenho. Estas mesmas conclusões valem para outros aspectos como massa específica, absorção de água e fissuramento.

TRAUNER (1991) estudou também o comportamento de tijolos executados com adições de Cinza de Lodo, em diversos percentuais conforme mostra a TABELA 4.5, quanto ao peso específico, absorção de água e fissuras por queima, obtendo bons resultados.

TABELA 4.5 Avaliação de tijolos executados com adições de cinza de Lodo sanitário (TRAUNER, 1991).

<b>% de adição de Cinza de Lodo</b>	<b>Massa específica (kg/dcm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção de Água (%)</b>	<b>Fissuras na queima (%)</b>
0	1,88	13,25	1,0
10	1,69	18,80	1,1
20	1,56	19,37	2,1
30	1,50	22,54	3,5

Não obstante aos resultados terem sido positivos, a utilização da Cinza de Lodo, em larga escala industrial, na produção de tijolos, também não tem ocorrido, principalmente,

neste caso, devido a questões de custo e também ambientais, no que se refere à comprovação da disposição final segura do resíduo.

Quanto aos custos, o baixo preço destes materiais de construção, e as possíveis alterações no processo produtivo, decorridas da inserção de um novo insumo, tem desmotivado a indústria de usar esta tecnologia.

Quanto ao aspecto ambiental, no caso da Cinza, esta possui uma carga orgânica praticamente nula, porém uma concentração de poluentes maior que o do Lodo seco, o que implica em que sejam realizados estudos profundos quanto à estabilização do resíduo, o que até o momento praticamente não foram realizados.

Os resultados obtidos por TRAUNER (1991) apresentaram-se muito diferentes dos obtidos por TAY (1987) com a mesma metodologia empregada. Segundo TRAUNER (1991), isto ocorre devido às diferenças de materiais tanto de argilas como do próprio Lodo.

Este fato implica que para cada local deve-se estudar as características dos materiais antes de sua utilização e que as tecnologias neste campo não são transferíveis diretamente.

WIEBUSCH e SEYFRIED (1997) mostraram que estes materiais podem ser entendidos, a partir do seu aproveitamento, não mais como resíduo mas sim como recurso (insumo). Nos seus estudos no que se refere ao potencial de aproveitamento pela indústria de telhas e tijolos, a alternativa mostrou-se tecnicamente positiva.

## **4.2 AGREGADO LEVE PRODUZIDO COM LODO**

### **4.2.1 Agregado graúdo leve**

Conforme SIMONDI et al. (1992), embora venha se estudando a fabricação de agregado graúdo leve para concretos desde a década de 70, a utilização de concretos com este material é muito recente.

Desde 1975, a Companhia Estadual de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) vem estudando, como alternativa para disposição final dos Lodos de suas Estação de Tratamento de Esgotos Sanitários, a produção de agregados leves para concreto a partir deste resíduo. Os primeiros estudos desenvolvidos por BROSCH et al. (1975) foram realizados com os Lodos da Estação de Tratamento Pinheiros, da cidade de São Paulo.

Estes estudos tiveram continuidade no Brasil por SIMONDI et al. (1989) e SANTOS (1992) na cidade de São Paulo e também em outras cidades brasileiras, como foi o caso de Londrina (AGOPYAN e MORALES, 1992). No exterior também foram feitos estudos similares (BHATTY e REIDT , 1989).

A produção de agregado graúdo leve com Lodo de ETES tem sido realizada seguindo-se as seguintes operações básicas:

- pré-secagem dos Lodos, obtendo-se uma umidade da ordem de 65%;
- conformação de elementos cilíndricos do Lodo ;
- pelotização do Lodo, o que é realizado posteriormente ao material ser extrudado, com a adição de finos;
- secagem das pelotas, até que atinjam umidade da ordem de 15%;
- sinterização das pelotas, ou seja, calcinação das pelotas através de um queimador a gás ou a óleo, até o consumo total da matéria orgânica e combustível presentes no Lodo;
- quebraimento em pedaços menores que 10 cm e estabilização do sinter através de equipamentos mecânicos e
- classificação dimensional do sinter através de peneiras vibratórias mecânicas.

BROSCH (1975) afirma que o agregado produzido a partir dos Lodos atende as normas técnicas. Se comparado com outros agregados leves, como a argila expandida, apresenta resultados bastante satisfatórios.

Conforme SANTOS (1992), o problema enfrentado com a produção deste tipo de material são, além dos elevados custos, que o tornam pouco competitivo em relação aos

agregados graúdos leves convencionais, o fato de que o consumo de agregados leves, principalmente pela engenharia brasileira, ainda é bastante pequeno.

A produção de agregado leve encontra, portanto, como principal dificuldade o mercado, o qual tem entendido que esta alternativa é viável tecnicamente, porém de custo elevado em comparação com as alternativas disponíveis.

#### 4.2.2 Agregado miúdo Leve

Conforme estudos realizados por KATO e TAKESUE (1984), pode-se produzir agregados miúdos leves a partir de Cinza de Lodo Sanitário. O processo de obtenção deste agregado consiste na incineração do Lodo a 1050 °C, seguindo-se um rápido resfriamento com água.

A TABELA 4.6 mostra os resultados obtidos por KATO e TAKESUE (1984), na utilização de agregado miúdo leve de Cinza de Lodo, em argamassas, comparando com o uso de areia e agregado miúdo artificial, obtidos pela moagem de rochas graníticas.

TABELA 4.6 Massa específica de agregados e resistência à compressão simples de argamassas (KATO e TAKESUE, 1984).

<b>Tipo de Agregado miúdo</b>	<b>Massa específica (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Res. à compressão aos 7 dias (MPa)</b>	<b>Res. à compressão aos 28 dias (MPa)</b>
<b>Agregado miúdo leve de Cinza de Lodo</b>	1,33	23,9	41,0
<b>Agregado miúdo artificial</b>	1,63	27,7	44,8
<b>Areia</b>	2,61	30,1	46,9

Nos estudos realizados por KATO e TAKESUE (1984), o agregado miúdo de Lodo tem um densidade menor que a areia e que o agregado artificial. Nas argamassas confeccionadas quanto a resistência à compressão aos 7 dias, o desempenho com agregado

de Lodo foi inferior as outras, porém aos 28 dias de idade todas as argamassas apresentaram resistências da mesma próximas. Com estes resultados os autores afirmam que o agregado feito de resíduo pode ser uma alternativa viável tecnicamente.

KHANBIVARDI e AFSHARI (1995) também investigaram a possibilidade de produção de agregados miúdos leves a partir de cinzas de Lodo e concluíram que pode-se substituir, em concretos, 30% do agregado miúdo convencional, pelo novo agregado sem prejuízos ao material.

#### **4.2.3 Considerações sobre a produção de agregados**

Nas pesquisas realizadas para obtenção de agregados a partir de Lodo Sanitário, foi comprovada a eficiência destes, principalmente no desempenho mecânico de concretos e argamassas. Porém não foram realizadas investigações sobre a fixação segura dos poluentes constituintes do resíduo, nas matrizes.

A farta disponibilidade de agregados na maioria das regiões e os baixos custos destes tem sido impicílio ao aproveitamento dos agregados obtidos a partir dos resíduos sanitários.

Os dois aspectos citados tem feito com que esta alternativa de aproveitamento ainda não seja totalmente utilizada pela Indústria da construção.

### **4.3. UTILIZAÇÃO DOS LODOS COMO ADIÇÃO MINERAL NA PRODUÇÃO DE CIMENTOS E CONCRETOS**

#### **4.3.1 A questão das adições ao concreto**

Conforme ALMEIDA (1990), a definição do que são propriamente os materiais pozolânicos e/ou adições utilizáveis nos concretos não é muito clara na literatura técnica.

O Comit  212 do ACI (American Concrete Institute) (1985) classifica as adi es em p  segundo 4 tipos:

- Cimentícios: cimentos naturais ou cales hidráulicas produzidas pela queima de rochas calcárias argilosas, assim como cimentos de escória e escória granulada de alto forno;
- Pozolânicos: materiais silicosos ou silicosos e aluminosos que por si só, possuem pouco ou nenhum poder cimentício, mas que na forma de p  e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio em temperaturas normais, formando compostos com propriedades ciment ceas. Exemplos disto são as cinzas volantes, cinzas vulcânicas ácidas no seu estado natural ou calcinadas, alguns xistos e argilas calcinadas e alguns subprodutos industriais, como a sílica ativa;
- Pozolânicos e cimentícios: cinza volante classe C, cujo teor de cal livre no material é suficiente para produzir reação ciment cea quando o material está  mido. A escória granulada de alto forno, da mesma forma, possui tanto características pozolânicas como ciment ceas;
- Outros – são materiais quimicamente inertes que, quando na forma de p , são atacados pela cal e pelos álcalis liberados durante a hidratação do cimento Portland, favorecendo ao longo do tempo o aparecimento de efeitos benéficos   resistência mecânica, permeabilidade e resistência química. São exemplos destes materiais o quartzo, dolomita, rochas calcárias e vários produtos rochosos silenciosos, além de granito e asbesto.

Já a Norma Européia ENV 206, conforme ALMEIDA (1990), denomina adi es aos materiais inorgânicos finamente divididos que podem ser incorporados aos concretos com a finalidade de aprimorar ou acrescentar determinadas propriedades ao material.

Esta norma divide as adi es em dois tipos: Tipo I – adi es praticamente inertes e Tipo II- adi es pozolânicas ou potencialmente hidráulicas.

Conforme MALHOTRA e MEHTA (1996), os benefícios do uso de adi es minerais no cimento ou em concretos pode ser dividido em três categorias :benefícios de engenharia, benefícios econômicos ou benefícios ecológicos.



Benefícios de engenharia: primeiro, a incorporação de finas partículas na mistura de concreto tende a melhorar a trabalhabilidade e reduzir a quantidade de água para dar consistência, exceção a materiais muito finos como por exemplo a sílica ativa. Em segundo lugar há um incremento da resistência, redução da permeabilidade e aumento da durabilidade ao ataque químico. Também uma redução nas fissuras térmicas pode ocorrer devido a se ter um menor calor de hidratação do concreto.

Benefícios econômicos: O cimento Portland representa o mais caro dos materiais utilizados no concreto e seu custo tem aumentado nos últimos anos devido ao aumento do custo da energia. Como a maioria dos materiais utilizados como adições são subprodutos industriais ou resíduos, obviamente quando se substitui parte do cimento por estes materiais tem-se uma redução do custo do aglomerante e, por consequência, do concreto.

Benefícios Ecológicos: Muitos dos subprodutos utilizados como adições minerais a cimentos ou concretos contém nas suas composições materiais poluentes, tóxicos e mesmo patogênicos e podem ser nocivos ao homem se não forem dispostos de uma forma segura. O lançamento destes produtos em mananciais ou o uso como aterros não tem sido uma prática segura, porque contaminam o meio ambiente em que são colocados. A indústria do cimento e do concreto tem se tornado um veículo preferencial para disposição de subprodutos, principalmente porque a maioria dos materiais contaminantes, como metais, podem ser seguramente incorporados na hidratação dos produtos do cimento. Outro ponto importante é quanto a poluição que causam as indústrias de cimento, principalmente quanto à emissão de CO<sub>2</sub> e outros poluentes. No caso do aproveitamento de subprodutos existem um grande ganho ambiental porque se reduz a quantidade de cimento produzido, reduzindo-se a poluição e também preservando os recursos naturais para próximas gerações.

Conforme MEHTA e MONTEIRO (1994), fazendo-se uma análise técnica, econômica e ecológica, não há melhor alternativa do que o concreto para as milhões de toneladas de subprodutos pozzolânicos e cimentícios. A estocagem destes subprodutos no solo causa a poluição do ar, enquanto seu despejo em lagos e córregos ocasiona a liberação dos metais tóxicos normalmente presentes em pequenas quantidades. Mesmo as aplicações de menor valor, tais como aterros e materiais granulares para sub-bases e ombreiras de

rodovias são, em última análise, alternativas de risco para a saúde humana, porque os metais tóxicos irão se infiltrar no lençol freático. Por outro lado, o uso de subprodutos como constituintes de cimento Portland composto, ou como adições minerais no concreto, representa um maneira relativamente barata de disposição adequada dos elementos tóxicos presentes.

Conforme OBA apud MEHTA e MONTEIRO (1994) em pesquisa realizada no Japão, mostrou que muitos metais tóxicos podem combinar-se quimicamente com os produtos de hidratação do cimento Portland.

BENSON et al. (1983) apresentaram uma pesquisa em que mostraram ser possível utilizar o cimento como fixador de um resíduo de lixo, que continha em sua composição o metal pesado Cádmio. Neste trabalho foi verificada a possibilidade de adicionar resíduos no concreto, sob forma de cinza (resíduo incinerado), sem modificar substancialmente as propriedades mecânicas do concreto, desde que mediante ensaios sejam estabelecidas as proporções possíveis.

Estudos anteriormente realizados por COOK et al. (1977), MEHTA (1977), NARANG et al. (1982), SWAMY (1986), MALHOTRA (1987), entre outros, também já indicavam o grande potencial de uso de resíduos como material componente do cimento.

#### **4.3.1.1 Adições pozolânicas e/ou cimentantes**

Conforme MEHTA e MONTEIRO (1994), adições pozolânicas são materiais silicosos finamente moídos, adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, em relação a massa de cimento Portland. Uma classificação das adições pozolânicas, de acordo com as suas características, é apresentada na TABELA 4.7, onde também são apresentadas as composições mineralógicas e características das partículas, uma vez que estas duas propriedades, mais do que a composição química ou origem do material, é que determinam o efeito de uma adição mineral sobre o comportamento do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

TABELA 4.7 Classificação das adições pozolânicas de acordo com as suas características (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

<b>Classificação / material</b>	<b>Composição química mineralógica</b>	<b>Características das partículas</b>
<b>Cimentante e pozolânicos</b>		
Escória granulada de alto-forno	Na maior parte são silicatos vítreos contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio e sílica. Podem estar presentes em pequena quantidade compostos cristalinos do grupo melita	O material não processado tem a dimensão da areias e contém de 10 a 15% de umidade. Antes de empregado deve ser seco e moído até partículas menores que 45 $\mu$ m (cerca de 500m <sup>2</sup> /kg de finura Blaine). As partículas tem textura rugosa.
Cinza volante alto-cálcio	Na maior parte vidro de silicato contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio, e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste geralmente de quartzo e C3A; podem estar presentes em carvões de elevado teor de enxofre. O carbono não queimado é comumente inferior a 2%.	Pó com 10-15% de partículas maiores que 45 $\mu$ m (comumente Blaine entre 300 e 400 m <sup>2</sup> /kg). Muitas partículas são esferas sólidas menores que 20 $\mu$ m de diâmetro. A superfície das partículas é geralmente lisa mas não tão limpas quanto as cinzas de baixo teor de cálcio.
<b>Pozolanas altamente reativas</b>		
Sílica ativa	É essencialmente constituída de sílica pura na forma não cristalina	Pó extremamente fino consistindo de esferas sólidas de diâmetro médio 0,1 $\mu$ m (área específica por adsorção de nitrogênio 20m <sup>2</sup> /g)
Cinza de casca de arroz	É essencialmente constituída de sílica pura na forma não cristalina	As partículas são geralmente menores que 45 $\mu$ m, mas são altamente celulares (área específica por adsorção de nitrogênio 60m <sup>2</sup> /g)
<b>Pozolanas comuns</b>		
Cinza volante de baixo teor de cálcio	Na maior parte vidro de silicato contendo alumínio, ferro e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste de basicamente quartzo, milita, silimanita, hematita e magnetita.	Pó com 15-30% de partículas maiores que 45 $\mu$ m ( Blaine de 200-300 m <sup>2</sup> /kg). A maior parte das partículas são esferas sólidas com 20 $\mu$ m de diâmetro médio.
Materiais naturais	As pozolanas naturais contém quartzo, feldspato e mica, além de vidro de aluminossilicato	As partículas são moídas abaixo de 45 $\mu$ m, na maior parte tem textura rugosa.
<b>Pozolanas pouco reativas</b>		
Escória de alto-forno resfriada lentamente e cinza de casca de arroz queimada em campo.	Consiste essencialmente de silicatos cristalinos e somente uma pequena quantidade de matéria não cristalina	Os materiais devem ser moídos a um pó muito fino para desenvolver uma certa atividade. As partículas moídas tem textura rugosa.

Conforme METHA e MALHOTRA (1996), o uso de materiais pozolânicos e cimentícios no cimento e no concreto tem aumentado muito nos últimos 50 anos. Os autores prevêem que num futuro próximo a utilização de cimentos sem estas adições seja a exceção à regra.

Algumas adições são pozolânicas, algumas são cimentantes e outras são tanto cimentantes como pozolânicas. Conforme MEHTA E MONTEIRO (1994) estas adições podem ser classificadas em dois grupos conforme a origem:

**Materiais naturais:** são materiais processados com o único objetivo de produzir uma pozolana. O processamento consiste usualmente de britagem, moagem, classificação por tamanho, em alguns casos pode também incluir ativação. Pode também estar presentes operações como queima ou incineração. Entre os principais materiais naturais utilizados pode-se citar: terras diatomáceas, vidros vulcânicos, tufos vulcânicos, argilas ou folhelhos calcinados.

**Subprodutos:** materiais que não são produtos primários de suas respectivas indústrias produtoras. Os subprodutos industriais podem ou não requerer processamentos.

Entre os mais conhecidos materiais pozolânicos subprodutos pode-se citar: a cinza volante, a escória granulada de alto forno, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulin (este também pode ser naturalmente encontrado).

Ass adições pozolânicas atuam no concreto basicamente através da reação pozolânica, exemplos destes são as cinzas volantes, a cinza de casca de arroz e a sílica ativa.

Já os adições cimentantes/pozolânicas, devido a sua composição química, podem atuar tanto reagindo como pozolana como também como material cimentante hidráulico, exemplos destes pode ser algumas escórias de alto forno.

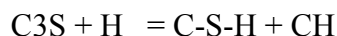
A reação química entre uma pozolana e o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) é chamada de reação pozolânica (SWAMY et al., 1986; MALHOTRA et al. , 1987; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A reação pozolânica, da mesma forma que a reação de hidratação do cimento Portland, forma o C-S-H (Silicato de cálcio hidratado), porém a reação pozolânica não

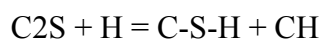
forma este material a partir da combinação entre a água os compostos do cimento e sim numa etapa posterior à reação de hidratação do cimento. Isto é, a pozolana reage com o CH (hidróxido de cálcio) formado pelas reações de hidratação em presença de água numa etapa secundária à reação de hidratação, por isto também é conhecida como reação secundária.

MEHTA E MONTEIRO (1994) exemplificam as duas reações no esquema apresentado abaixo.

### **Reação do cimento Portland**

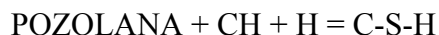


Silicato tri-cálcico mais água produzindo silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio



Silicato bi-cálcico mais água produzindo silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio

### **Pozolana**



Pozolana mais cal hidratada formada na reação de hidratação do cimento Portland na presença de água forma silicato de cálcio hidratado.

Na TABELA 4.8 são apresentadas as características químicas do cimento de uma escória com característica pozolanica e cimentante e uma cinza volante, onde pode ser observado a peculiaridades de cada material. Para fins de comparação com o próprio cimento Portland, apresenta-se também na TABELA 4.8 limites de seus compostos químicos.

TABELA 4.8 Características químicas do cimento de uma escória com característica pozolana e cimentante e um cinza volante (ALMEIDA, 1990 e PETRUCCI, 1978).

Compostos	Cinza Volante		Escória Granulada de Alto Forno	Cimento Portland Comum	
	Mín. (%)	Máx. (%)		Média (%)	Mín. (%)
SiO <sub>2</sub>	15,44	66,22	34,00	20,00	23,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,00	37,15	14,00	4,50	7,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,00	44,70	0,30	2,00	3,50
Na <sub>2</sub> O	0,00	7,30			
MgO	0,00	7,00	6,00	0,80	6,00
CaO	0,70	50,00	42,00	61,00	67,00
K <sub>2</sub> O	0,27	6,00			
TiO <sub>2</sub>	0,43	5,60			
SO <sub>3</sub>	0,00	9,00		0,00	3,00
MnO					
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O				0,30	1,50

#### 4.3.1.2 Adição de finos ou filers

Conforme NEVILLE (1997), na classificação dos Cimentos Portland Compostos, os filers podem ser incluídos até um certo teor máximo. O autor aponta que estes materiais tem sido utilizados em muitos países a algum tempo.

O filer é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland, que, devido às suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação ou tendência de fissuração. Usualmente os filers são inertes, mas não é desvantajoso que apresentem algumas propriedades hidráulicas ou se entrarem em reações não prejudiciais como os produtos de hidratação. Os filers podem também ativar a hidratação do cimento Portland atuando como ponto de nucleação (NEVILLE, 1997).

Conforme CANOVAS (1996) os filers empregados como adições ao cimento Portland são materiais inorgânicos minerais, naturais ou artificiais, especialmente

selecionados, que melhoram as propriedades do cimento, por exemplo, a trabalhabilidade ou a retenção de água. Os filers podem ser inertes ou possuírem características hidráulicas em pequenas escala, terem forte características cimentantes ou serem materiais pozolânicos.

Quanto aos materiais que são formados, podem ser tanto naturais como processados, sendo importante que apresentem propriedades uniformes, especialmente a finura. Os filers não devem aumentar a demanda de água do concreto, a menos que usados como aditivos redutores de água, para não prejudicar a resistência do concreto a intempéries ou mesmo a proteção às armaduras. Também a adição de filers não deve resultar numa reduzida resistência do concreto a longo prazo.

Como a ação dos filers é predominantemente física, eles devem ser fisicamente compatíveis com o cimento com o qual vão ser usados. Por exemplo, com um alto teor de filers o cimento deve apresentar um finura muito maior que usual, de forma a manter uma graduação granulométricas na mistura.

Conforme PETRUCCI (1978), os filers são agregados muito finos, compreendidos entre  $5\mu\text{m}$  e  $75\mu\text{m}$ , que podem ser utilizados em concreto asfáltico, adição a cimentos, adição a concretos, entre outros.

GONÇALVES (2000), fazendo uma revisão bibliográfica sobre os filers, buscou diferenciar estes como adição ou como agregados. Segundo o autor, a bibliografia indica que quando as partículas apresentam diâmetro médio inferior a  $50\mu\text{m}$ , contribuem significativamente para um melhoramento da matriz cimentícia, através do preenchimento dos vazios deixados pelos produtos de hidratação do cimento ou pela não hidratação de parte cimento. Quando os diâmetros médios estão entre  $50\mu\text{m}$  e  $150\mu\text{m}$ , contribuem para o preenchimento dos vazios deixados pela descontinuidade da curva granulométrica do agregado miúdo.

Conforme MENÉNDEZ, BONAVETTI e IRASSAR (2000) e IRASAR et al (2000), a adição de filers no cimento completa a fração fina na curva granulométrica do concreto sem aumentar a demanda de água, melhorando com isto o empacotamento e reduzindo a capilaridade através da obstrução dos poros.

Conforme SOROKA e STERN ( 1977), os filers podem atuar como pontos de nucleação dos cristais de hidróxido de cálcio, nas primeiras idades, acelerando com isto a hidratação dos compostos do clínquer, especialmente o  $C_3S$ .

De acordo com SERSALE (1992), o uso de filers pode melhorar as resistências iniciais do concreto, mas caso não sejam materiais pozolânicos não produzem C-S-H.

Conforme MENÉNDEZ, BONAVENTI e IRASSAR (2000), a utilização de filers e escória de alto-forno como adição ao cimento podem se complementar no que se refere às melhoria das propriedades do concreto, ou seja, os finos melhoram as resistências nas primeiras idades e a escória melhora nas idades mais avançadas.

De acordo com GONÇALVES (2000), os filers podem influenciar tanto nas propriedades mecânicas quanto na durabilidade. Conforme o autor nas propriedades mecânicas as maiores influências são nas idades iniciais, por estes materiais estarem difundidos em toda a mistura e por apresentarem grande finura, agindo no fechamento dos poros do concreto. Já nas idades mais avançadas, como estes não possuem atividade química, não conferem ganhos nestas propriedades. A maior contribuição dos filers é na diminuição da permeabilidade e no refinamento da estruturas dos poros.

Conforme NEVILLE (1997), embora as normas estabeleçam percentuais de 0% a 10% de teor de filers em relação à massa do cimento, como são os casos das normas brasileiras mostradas na TABELA 4.9, a norma européia ENV 197-1992 já admite o uso de até 35% de calcário, desde que o restante do material cimentício seja apenas cimento Portland, e com esta adição o cimento passa ter o nome de Portland Calcário II/B-I.

Como o calcário moído adicionado é na realidade um filer, pode-se dizer que já existem cimentos com teores de até 35%. NEVILLE (1997) acredita que para determinadas finalidades, num futuro próximo se tornem populares cimentos com 15% a 20% de filers.



TABELA 4.9 Composição dos cimentos Portland conforme as normas da ABNT

<b>Tipo de Cimento Portland</b>	<b>Sigla</b>	<b>Clínquer + gesso (%)</b>	<b>E Escória de Alto forno (%)</b>	<b>Z Material pozolânico (%)</b>	<b>F Filers (%)</b>	<b>Norma da ABNT</b>
Comum	CPI CPI-S	100 95-99			1-5	NBR5732
Composto	CPII-E CPII-Z CPII_F	56-94 76-94 90-94	6-34	6-14	0-10 0-10 0-10	NBR11578
Alto-forno	CPIII	25-65	35-70		0-5	NBR5735
Pozolânico	CPIV	45-85		15-50		NBR5736
Alta Resistência inicial	CPV- ARI	95-100			0-5	NBR5733

LEA citado por ANDRIOLO(1998) afirma que rochas finamente moídas ou areias muito finas incorporadas a concretos compactados a rolo ou mesmo concretos convencionais de baixa resistência tem melhorado o desempenho destes quanto à plasticidade dos materiais.

Na construção da Barragem Jordão vários materiais foram utilizados na confecção dos concretos, tanto do compactado a rolo como dos massa. A utilização de filers foi também bastante importante, principalmente para a redução da permeabilidade destes concretos. A TABELA 4.10 mostra as caracterizações dos cimentos e das adições utilizadas nesta obra.

TABELA 4.10. Dados dos materiais utilizados para estudos na Barragem Jordão (ANDRIOLO, 1998)

<b>Característica</b>	<b>Unidade</b>	<b>CPI-S</b>	<b>CPV</b>	<b>Cinza volante</b>	<b>Argila calcinada</b>	<b>Filer1 Areia moída</b>
% retida na #200	%	2,36	0,87	2,5	-	16,6
Superfície específica Blaine	Cm <sup>2</sup> /g	3670	4600	2900	3000	2520
Massa específica absoluta	G/cm <sup>3</sup>	3,1	3,26	2,3	2,63	2,76

A utilização de filers com alto teor de sílica tem apresentado interessantes propriedades para os concretos compactados a rolo e massa, como por exemplo (ANDRIOLO, 1998):

- Finura similar ou, em alguns casos, menor que a dos cimentos utilizados;
- Diâmetros médios próximos a 25 µm, normalmente pouco superiores aos cimento que podem variar de 10 a 15 µm;
- Os grãos de areias moídas ou basaltos moídos analisados pelo microscópio eletrônico mostram-se equidimensionais;
- A atividade pozolânica dos filers tem aumentado de acordo com a finura;
- Alguns filers testados tem demonstrado substancial eficiência na redução das expansões devido as reações álcali –agregados, demonstrando assim outra importante ação pozolânica.

#### 4.3.2. A utilização da cinza de lodo em concretos

Uma das linhas de pesquisas que se iniciou na década de 80 foi referente à possibilidade de aproveitamento dos Lodos como adição na produção de concreto e argamassas (BHATTY E REID, 1989).

O concreto, que é um principais materiais da Indústria da Construção, apresenta um grande potencial para absorver outros materiais como aglomerante, como adição , como finos ou como agregados (SWAMY et al., 1986; MALHOTRA et al. , 1987; CINCOTTO, 1990; MEHTA E MONTEIRO, 1994)..

Algumas experiências isoladas foram realizadas vislumbrando-se o uso do Lodo “in natura” no concreto, mas foram terminantemente descartadas de serem continuadas devido à incompatibilidade química entre os compostos do concreto, suas reações químicas e a matéria orgânica sempre presente em grande quantidade nos Lodos.

No que se refere à utilização do Lodos incinerados, alguns pesquisadores, após terem utilizado o resíduo na produção de tijolos, realizaram experimentos com a utilização da Cinza de Lodo adicionada ao concreto. O pequeno número de experimentos, bem como as limitadas análises realizadas, não permitiram que se obtivessem resultados conclusivos sobre o tema (TAY,1986; TAY,1987;TAY e SHOW,1993 )

Conforme MEHTA (1984), dentre os diversos processos para obtenção de materiais com atividade pozolânica para serem adicionados ao concreto está o de submeter os materiais ao algum processo com calor. A calcinação ou incineração de materiais tem sido uma alternativa para obtenção de atividade pozolânica em alguns materiais, como são os casos de algumas argilas, folhelhos e argilas xistosas.

A incineração a temperaturas na ordem de 600 a 900 °C tem possibilitado a transformação de materiais argilosos em finos com atividade pozolânica. Um bom exemplo disto foi a incineração de uma argila da Índia, que era originalmente utilizada para fabricação de tijolos e que com a sua incineração obteve-se d excelente pozolana chamada

Surkhi (MEHTA, 1984). Este exemplo suscitou que o processo de queima passasse a ser estudado para outros materiais de semelhante composição (MEHTA, 1984).

A produção de pozolanas a partir de processos de queima controlada necessitam de um elevado consumo de energia, por esta razão a incineração de argilas não tem sido amplamente explorada. Se comparadas às pozolanas originadas com resíduos industriais, como as escórias de alto forno e as cinzas volantes, que são disponíveis em grande quantidade e não necessitam de onerosos processos de beneficiamento, as argilas passam a ser desconsideradas como matéria prima para obtenção de pozolanas, por razões econômicas.

Entretanto, ao se pensar não especificamente em argilas, mas em outros materiais semelhantes e que ofereçam riscos ambientais e por esta razão necessitem de algum tratamento para que se tornem estáveis, como é o caso do Lodo, a hipótese de incineração passa a merecer especial atenção. Neste caso, como a incineração torna-se parte do processo de estabilização e ao mesmo tempo permite uma utilização do produto, seus custos, se bem dimensionados, podem ser aceitáveis (GENAZZI, 2000).

#### **4.3.2.1 Concreto executado com adição de cinza de Lodo**

Conforme TAY e SHOW (1993), os crescentes custos da produção de cimento associados com a necessidade de proteção ambiental, fez com que os pesquisadores da área de materiais e do meio ambiente passassem a estudar em conjunto a possibilidade de exploração dos resíduos de tratamentos de esgotos e de lixo como insumo para a produção de materiais cimentantes.

TAY (1986) afirma que: “como a geração de Lodos de esgotos sanitários é inevitável e a incineração destes tem se mostrado um meio bastante viável para o tratamento deste resíduo, o aproveitamento na produção de concreto pode ser uma das alternativas para uso destas cinzas”.

A possibilidade de utilização das cinzas com adição ao concreto foi analisada por TAY (1987), através de experimentos realizados em concretos frescos e

endurecidos com adição de diferentes percentuais de cinza de Lodo em substituição ao cimento. TAY (1986 e 1987) realizou experimentos com adições de Cinzas de Lodo em concreto, coletando amostras de Lodos de diferentes estações de tratamento de esgotos, as quais foram incineradas a 550 °C de temperatura. Objetivando analisar o desempenho da adição das cinzas ao concreto foram moldados corpos-de-prova prismáticos de dimensões 10x10x10cm executados com diferentes quantidades, em substituição ao cimento, e comparadas com corpos-de-prova sem adição. O traço do concreto em massa foi 1:2:4 com relação a/c (água/cimento) = 0,50, sendo que o cimento utilizado foi o Portland comum. As quantidades de cinzas utilizadas em substituição ao cimento foram de 5%, 10%, 15% e 20%.

BHATTY e REID (1989) incineraram Lodos e utilizaram as cinzas como adição a argamassas de cimento e areia. Nestes experimentos, os pesquisadores investigaram o desempenho de argamassas adicionadas com estas cinzas e concluíram que as cinzas podem apresentar alguma atividade pozolânica e com isto beneficiarem as argamassas ou concretos com elas executados. Porém a maior vantagem constatada foi a atuação das cinzas como finos, que adicionado às argamassas podem aumentar o desempenho mecânico destas. Os autores também salientaram o grande potencial de consumo deste tipo de cinza, pois são significativas as quantidades de argamassas utilizadas na engenharia civil e a adição de cinzas não exige nenhuma operação especial.

As TABELAS 4.11 e 4.12 mostram os ensaios realizados e os resultados obtidos com o concreto executado com estas diferentes quantidades de cinzas. Na TABELA 4.11 apresenta-se os resultados da avaliação da trabalhabilidade e o tempo de pega e na TABELA 4.12 a resistência à compressão simples em diferentes idades, a absorção de água e a densidade.

TABELA 4.11 Trabalhabilidade e tempo de início e fim de pega (TAY, 1987)

<b>PERCENTAGEM DE CINZA</b>	<b>Abatimento (mm)</b>	<b>Início de Pega (h)</b>	<b>Fim de Pega (h)</b>
<b>0 %</b>	150	3,33	4,25
<b>5%</b>	110	3,58	4,00
<b>10%</b>	120	3,50	3,93
<b>15%</b>	150	3,47	3,88
<b>20%</b>	200	3,42	3,82

A adição de Cinza de Lodo reduziu a consistência para teores de adição de 5% e 10% e aumentou para 15% e 20% em relação ao concreto sem adição. Quanto aos tempos de pega, não foram significativas as diferenças entre o concreto sem adição e os com adições.

TABELA 4.12. Propriedades do concreto endurecido com adição de cinza de Lodo (TAY, 1987).

<b>ADIÇÃO DE CINZA (%)</b>	<b>Resistência à Compressão 3 dias (MPa)</b>	<b>Resistência à Compressão 7 dias (MPa)</b>	<b>Resistência à Compressão 14 dias (MPa)</b>	<b>Resistência à Compressão 28 dias (MPa)</b>	<b>Massa específica (tf/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção (%)</b>
0	24,1	27,5	31,2	34,9	2,39	6,09
5	21,6	25,9	29,7	33,0	2,35	6,16
10	21,8	25,2	28,1	31,0	2,35	6,03
15	17,0	21,5	24,4	27,1	2,36	6,03
20	14,9	16,8	20,0	23,7	2,39	5,59

Em todas as idades ensaiadas por TAY (1987), a adição de Cinza de Lodo promoveu quedas na resistência à compressão. Aos 28 dias, teores de adição de até 10% provocaram quedas próximas a 11% na resistência, o que pode ser considerado como aceitável. Porém, em teores de adições superiores, as quedas de resistências foram muito maiores, atingindo 33% com adições de 20%.

Fato relevante nos experimentos de TAY (1987) é que nos concretos adicionados o crescimento percentual das resistências ao longo do tempo foram superiores ao verificado no concreto sem adição. Por exemplo: no concreto sem adição entre 3 e 91 dias de idade a resistência cresceu 44,8%, e entre 7 e 91 dias 26,9%. Já no concreto com 20% de adição, para estas idades os percentuais foram respectivamente 59,0% e 41,0%.

TAY (1987) alerta, no entanto, que as propriedades a longo prazo, bem como a própria durabilidade do concreto executado com cinzas de Lodo devem ser mais profundamente analisadas para que se possa propor esta alternativa como segura e mesmo lançá-la na Indústria da Construção.

O pesquisador recomenda que, enquanto estudos mais detalhados não sejam realizados, a utilização de cinzas não seja feita para a confecção de concretos estruturais e sim somente para obras não estruturais, como pisos, pavimentos, meio fios, entre outras.

GEYER, CONSOLI e DAL MOLIN (1997 e 1998), baseando-se nas pesquisas realizadas por TAY(1987), realizaram ensaios de resistência à compressão simples e de Abatimento de Tronco Cone (Slump Test) em concretos com adições de cinzas de Lodos sanitários geradas na cidade de Porto Alegre.

A amostras de Lodo foram coletadas na ETE IAPI e submetidas à secagem e incineração à temperatura de 550°C. O material, após incinerado e resfriado naturalmente, foi moído em um moinho de bolas durante 30 minutos e então utilizado para os experimentos.

Foram ensaiados dois concretos, dosados em massa com relações água/aglomerante  $a/(c+ad) = 0,50$  e  $a/(c+ad) = 0,30$ , sendo utilizado na mistura cimento CPV-ARI. As quantidades de cinza utilizadas na substituição do cimento foram de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%.

Os ensaios com concretos com  $a/(c+ad) = 0,50$  tiveram com principal objetivo reproduzir os experimentos de TAY (1987) com materiais locais, com Cinza de Lodo da Cidade de Porto Alegre.

Os ensaios com concretos com  $a/(c+ad) = 0,30$  foram realizados com o objetivo de se verificar a influência das adições de cinzas de Lodos em concretos de alto desempenho, o que devido às características físico-químicas das cinzas presumia-se não agirem favoravelmente ao desempenho destes concretos.

A TABELA 4.13 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples realizados aos 28 dias de idade e na TABELA 4.14 apresentam-se os resultados de Abatimento de Tronco Cone (Slump Test ) realizados.

TABELA 4.13 Resistência à compressão simples de concretos com  $a/(c+ad)=0,30$  e  $a/(c+ad)=0,50$  com parte do cimento substituído por cinza de Lodo.

	<b>Concreto <math>a/(c+ad) = 0,50</math></b>	<b>Concreto <math>a/(c+ad) = 0,30</math></b>
<b>PERCENTAGEM de CINZA (%)</b>	Resistência à compressão simples aos 28 dias (MPa)	Resistência a compressão simples aos 28 dias (MPa)
<b>0</b>	26,6	49,0
<b>5</b>	23,8	27,6
<b>10</b>	15,2	20,1
<b>15</b>	13,8	17,1
<b>20</b>	14,0	15,1

TABELA 4.14 – Abatimento de Tronco cone (Slump Test ) de concretos com  $a/(c+ad)=0,30$  e  $a/(c+ad)=0,50$ , com parte do cimento substituído por cinza de Lodo.

	<b>Concreto <math>a/(c+ad)=0,50</math></b>	<b>Concreto <math>a/(c+ad) = 0,30</math></b>
<b>PERCENTAGEM de CINZA (%)</b>	Abatimento (cm)	Abatimento (cm)
<b>0</b>	8,0	8,0
<b>5</b>	9,0	10,0
<b>10</b>	9,0	10,0
<b>15</b>	11,0	12,0
<b>20</b>	14,0	16,0

As mesmas tendências encontradas nos experimento de TAY (1987), quanto à relação entre as consistências e o aumento do teor de adições foram constatadas nos dois concretos ensaiados por GEYER, CONSOLI e DAL MOLIN (1997 e 1998).

No concreto com  $a/(c+ad) = 0,50$  as resistências obtidas por GEYER, CONSOLI e DAL MOLIN (1997 e 1998) foram inferiores às obtidas por TAY (1987). Sendo estas quedas mais pronunciadas no concretos com adições.

A redução na resistência à compressão com o aumento das adições também foi verificada nestes ensaios. No caso dos concretos com  $a/(c+ad)=0,50$  as quedas foram de



mesma ordem percentual das obtidas nos ensaios de TAY (1987), porém nos concretos com  $a/(c+ad) = 0,30$  as reduções foram muito maiores, sendo de 44% com apenas 5% de adição.

Os valores obtidos para concretos com  $a/(c+ad) = 0,30$  foram tão expressivos que são indicativos de que neste tipo de concreto não são recomendadas adições de Cinzas de Lodo (GEYER, DAL MOLIN e CONSOLI, 1998)

TADAO, MASSA-AKI e SHUNSOKU (1998) também estudaram a possibilidade de utilização dos finos grãos de Lodos Sanitários obtidos da incineração do material no concreto.

No trabalho realizado buscou-se utilizar 5%, de substituição de cimento por Cinza de Lodo na produção de concretos com elevada fluidez ( $a/c = 0,80$ ). As cinzas obtidas possuíam uma superfície específica de 315 m<sup>2</sup>/kg e uma granulometria média de 19,6µm.

O autores compararam concretos sem substituição e concretos com substituição de 5% de cimento com escória de alto forno com concreto com 5% de Cinza de Lodo. Os resultados são apresentados na TABELA 4.15.

TABELA 4.15 Resultados de ensaios realizados por TADAO, MASSA-AKI e SHUNSOKU (1998)

<b>Tipo de concreto</b>	<b>Resistência à compressão simples aos 28 dias</b>
a/c= 0,80 sem adição	15,5 MPa
a/c= 080 com 5% de adição de escória de alto forno	18,1 MPa
a/c= 0,80 com 5% de adição de Cinza de Lodo Sanitário	16,9 MPa

Os resultados de ensaios de resistência à compressão simples demonstraram que a substituição de 5% de Cinza nestes concretos melhorava em 9% a resistência em comparação ao concreto sem a adição e que substituindo com escória o efeito de melhoria era de 17%.

TADAO, MASSA-AKI e SHUNSOKU (1998) não desenvolveram estudos complementares que verificassem a reatividade das Cinzas utilizadas, bem como a questão da estabilização definitiva destas no concreto.

#### **4.3.2.2 Discussão sobre os Concretos executados com adição de cinza de Lodo**

Nos estudos realizados, basicamente os pesquisadores se preocuparam com o desempenho mecânico dos concretos mediante às adições de Cinza de Lodo Sanitário.

Pode-se observar que uma pequena gama de tipos de concretos foram analisadas, não tendo sido estudados diferentes relações água/aglomerantes , por exemplo.

As questões relacionadas com o desempenho quanto a durabilidade dos concretos executados com estas adições e quanto a estabilização do resíduo nesta matriz, em nenhuma das pesquisas foram aprofundadas, ou seja, por exemplo as questões de durabilidade do concreto e a definitiva e segura fixação do resíduo neste material não foram respondidas.

No que se refere aos resultados obtidos, no entanto, deve-se salientar que, do ponto de vista mecânico e tendo em vista a bibliografia sobre o uso de resíduos no concreto, fica clara a possibilidade de aproveitamento das cinzas em algum tipo de concreto e em determinados teores de substituição. A potencialidade de aproveitamento, com base nos estudos, refere-se ao uso das adições em concretos com relações água/ aglomerante a partir de 0,50.

#### **4.3.3 Cimento feito de cal e cinza de Lodo**

Dando continuidade às pesquisas para utilização de Lodos na produção de cimento ou concretos, TAY e SHOW (1991) desenvolveram uma metodologia para produção de um cimento a partir da mistura de Cinza de Lodo com cal.

Amostras de Lodo foram coletadas de ETES, já parcialmente desidratadas em centrífugas, e submetidas a uma secagem numa temperatura de 105 °C até o material apresentar 95% de sólidos na sua composição. Após secas, as amostras de Lodo foram trituradas num triturador manual e peneiradas

O Lodo foi então misturado com cal à proporção de 1:1 e submetido a uma moagem em um moinho centrífugo. Posteriormente a mistura foi incinerada em um forno elétrico, por 4 horas, a uma temperatura de queima de 1000 °C.

Após a incineração o material gerado foi finamente moído em um moinho centrífugo e então obteve-se o chamado cimento.

As composições químicas do Lodo incinerado e do cimento obtido a partir dele são apresentadas na TABELA 4.16. Para permitir uma comparação foi apresentada também a composição química do Cimento Portland comum a fim de permitir uma comparação química dos materiais.

LABAHN (1983) apresenta valores limites dos componentes químicos de um Cimento Portland. Como forma de avaliação química individual do cimento produzido a partir de Lodo-cal foi adicionada a esta TABELA 4.16 os limites propostos pelo pesquisador.

TABELA 4.16 Análise química em percentual de massa(TAY e SHOW, 1991).

<b>Componentes</b>	<b>Cimento Portland</b>	<b>Lodo Incinerado a 550 °C</b>	<b>Cimento de Lodo e Cal queimado 4 horas a 1000 °C</b>	<b>Limite de LABAHN (1983)</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	20,86	20,33	24,55	18 - 24
<b>CaO</b>	63,30	1,75	52,11	60 - 69
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5,67	14,64	6,61	4 - 8
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4,11	20,56	6,26	1 - 8
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,21	1,81	1,05	<2,0
<b>MgO</b>	1,04	2,07	2,07	<5,0
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,17	0,51	0,17	<2,0
<b>SO<sub>3</sub></b>	2,11	7,80	4,88	<3,0

A análise química do cimento gerado da mistura de Lodo e cal mostrou que a maioria dos componentes do novo cimento atendem aos limites estabelecidos por LABAHN (1983), podendo portanto ser considerado quimicamente apto a ser utilizado como cimento.

TAY e SHOW( 1991), baseando-se na análise química realizada e em ensaios para medir a atividade pozolânica e resistência mecânica, chegaram à conclusão que o cimento

formado não pode ser considerado como cimento pozolânico. Quanto à resistência mecânica à compressão, ensaios mostraram que o cimento apresentou elevada resistência, sendo compatível com as resistências dos cimentos comerciais.

As experiências de TAY e SHOW (1991) indicaram que é possível produzir-se cimento a partir da adição de Lodo incinerado com cal, porém indicam a necessidade de realização de outros ensaios, principalmente para verificação das propriedades do material ao longo do tempo.

Esta alternativa implica em que grandes alterações no processo industrial sejam realizadas, para que se possa produzir um cimento com estas características, o que tem gerado rejeições pelas Industrias (TAY e SHOW, 1991)

#### **4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DE LODO SANITÁRIO COMO INSUMO NA ENGENHARIA CIVIL**

A revisão bibliográfica sobre o aproveitamento de Lodo Sanitário na Engenharia Civil tem apontado basicamente 2 usos: na produção de blocos cerâmicos (tijolos) e na produção de concretos.

No primeiro caso foram realizados estudos quanto ao uso do Lodo parcialmente desidratado e também das Cinzas de Lodo.

Os desempenhos mecânicos dos tijolos produzidos foram satisfatórios, ligeiramente superiores nos executados com Cinzas, porém, a sua utilização comercial tem esbarrado em problemas de adaptação e mesmo aceitação do insumo pela Indústria. Os custos elevados e também as incertezas quanto ao desempenho, ao longo do tempo, deste novo material tem sido constante preocupação. A questão da fixação dos poluentes e compostos nocivos, em caráter definitivo nesta matriz ainda não foi estudada, o que também tem sido alertado como ponto fundamental para a utilização deste produto.

A segunda grande possibilidade de aproveitamento do resíduo tem sido apontada como seu uso na produção de concretos, primeiro pelos grandes volume que este material é mundialmente produzido e segundo porque ele já é um usual consumidor de outros resíduos.

Três alternativas tem sido estudadas, a produção de agregados leves graúdos ou miúdos, a produção de um cimento e o uso como adições no concreto.

No caso dos agregados, tecnicamente esta alternativa pode ser considerada como aprovada, exceção à necessidade de alguns estudos sobre o aspecto de fixação definitiva do resíduo. Porém os elevados custos envolvidos para produção destes materiais em comparação com os tradicionalmente utilizados tem marginalizado esta opção.

No caso do cimento, as complexas operações de adição de cal e Lodo no processo produtivo, que implicariam em grandes transformações nas plantas produtoras de cimento, fez com que os estudos não passassem de alguns ensaios em laboratório. A Indústria cimenteira não considerou viável a possibilidade, embora não a rejeite sob o ponto de vista técnico.

O uso como adições a concretos, na forma de substituição parcial do cimento, tem sido apontada como a melhor alternativa de aproveitamento do Lodo, no caso de sua Cinza, na Construção Civil.

Os estudos apresentados neste capítulo demonstram que determinados concretos, com certos teores de adições de Cinzas de Lodos, apresentam desempenhos satisfatórios.

Observa-se, no entanto, que não foram investigados para quais concretos estas adições podem ser benéficas e em que teores de substituição do cimento Portland isto ocorre. Além disto, questões como o desempenho dos concretos adicionados, ao longo do tempo, não foram estudadas com profundidade.

Uma das principais questões no que se refere ao aproveitamento de resíduos é a ambiental, ou seja, a verificação se os concretos fixam e estabilizam de forma definitiva e segura os compostos nocivos dos resíduos. A bibliografia tem indicado, no caso da Cinza de Lodo, que isto pode ser possível, mas não foram realizados testes que comprovem este aspecto (WENG E HUANG, 1994).

Desta forma, acredita-se que somente a partir da realização de estudos mais profundos, no que se refere aos tipos de concretos e teores de adições possíveis, e também quanto à questão ambiental, é que esta alternativa, que não encontra nenhum impecílio de custo ou de produção, possa ser colocada em prática.

## **5 PROGRAMA EXPERIMENTAL: CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DE LODO SANITÁRIO DA ETE IAPI**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Com o objetivo de identificar as alternativas mais adequadas para o aproveitamento dos Lodos Sanitários da Cidade de Porto Alegre, tanto do ponto de vista técnico como da possibilidade de agregar maior valor, foi realizada a caracterização da Cinza do Lodo da ETE IAPI e avaliado seu potencial de reaproveitamento (alternativas para valorização).

Nesta caracterização das Cinzas incluídas análises físicas, químicas, morfológicas, microestruturais e de impacto ambiental .

### **5.2 PROCEDÊNCIA E AMOSTRAGEM DO LODO SANITÁRIO**

O Lodo analisado neste trabalho foi proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETE) do bairro IAPI, da cidade de Porto Alegre , cujo sistema de tratamento de esgotos é do tipo Lodos Ativado Convencional, conforme especificações apresentadas na FIGURA 2.3 do Capítulo 2.

A escolha desta planta de tratamento como local de coleta do Lodo ocorreu devido ao aspecto de que esta ETE é a única que está em plena atividade com sistema de tratamento similar aos que serão adotados em Porto Alegre, o que permite uma maior amplitude para os estudos realizados quanto aos futuros Lodos gerados na cidade.

A amostra de Lodo foi coletada no leito de secagem da ETE IAPI, apresentado na Foto 2.3 do Capítulo 2, no qual estavam depositados os descartes de um período de 30 dias de tratamento e 15 dias de secagem ao sol.

Foram coletados 1000 kg de Lodo, parcialmente desidratado, aleatoriamente, no leito de secagem ao sol, em uma só vez. O material foi colocado em recipientes fechados, tambores metálicos de 200 litros, e transportados até o local escolhido para a incineração.

Os incineradores especificados para as Estações de Tratamento de Esgotos na cidade de Porto Alegre são do tipo Fornos de Múltiplos Estágios, conforme especificação indicada no item 2.4.2.5.1 do Capítulo 2 desta Tese, os quais incineram o Lodo a uma temperatura média no centro do forno de 800 °C.

Como ainda nenhum incinerador foi instalado nas ETES de Porto Alegre, utilizou-se para esta pesquisa os incineradores da INFRAERO, instalados no Aeroporto Internacional Salgado Filho, os quais são utilizados para incineração dos esgotos sanitários e resíduos sólidos das aeronaves e do próprio aeroporto. Os equipamentos de propriedade da INFRAERO apresentam especificações técnicas compatíveis com os equipamentos internacionalmente utilizados para este fim e também com os que serão adotados nas ETES de Porto Alegre.

Considerando-se que as cinzas que serão geradas nas Estações de tratamento de esgotos da cidade serão obtidas à temperatura de 800 °C e como o objetivo deste trabalho é o estudo do aproveitamento deste material, adotou-se como fixa esta temperatura, para a obtenção da amostra.

De acordo com METCALF e EDDY (1992), não existem ainda procedimentos específicos para a queima de Lodos sanitários, no que se refere ao seu aproveitamento. Os autores comentam que os processos de incineração de Lodo Sanitário envolvem temperaturas normalmente acima de 550°C até a ordem de 950°C, e afirmam que dentro desta faixa de temperatura é possível eliminar a umidade e a matéria orgânica por completo.

No trabalho realizado pela SABESP e IPT (SANTOS, 1992), é declarado que diferentes temperaturas de queima, entre 500°C e 1000°C, não alteram, em muito, os compostos que resultam do processo, desde que a variação do teor de cinzas produzidas não ultrapasse 3%.

O tempo de queima nestes incineradores é automaticamente estabelecido em função do porte do equipamento e da quantidade de material a ser incinerado.

Para este trabalho o material foi dividido em 2 lotes de aproximadamente 500 kg de Lodo, parcialmente seco, e incinerados a uma temperatura constante no centro do incinerador de 800°C, por um período de 2h e 30 minutos para cada lote, obtendo-se um total de aproximadamente 100 kg de cinzas.



A Foto 5.1 mostra o material na forma obtida após a incineração e na Foto 5.2 apresenta-se o material destorroado manualmente.



FOTO 5.1 Amostra da Cinza do Lodo da ETE IAPI



FOTO 5.2 Cinza de Lodo Sanitário da ETE IAPI destorroada

### **5.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA**

A caracterização química das Cinzas de Lodo Sanitário obtidas pela incineração à temperatura de 800°C foi realizada nos laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), na cidade de São Paulo, utilizando-se a Análise Química Semiquantitativa por Espectrometria de Raios X. Na TABELA 5.1 são apresentados os resultados da análise.

TABELA 5.1 Análise química semiquantitativa por espectrometria de raios X das cinzas de Lodos sanitários obtidas em incineração à temperatura de 800°C, realizada na ABCP.

Composição Química		Espectrometria de Raios X (%)
Dióxido de silício	SiO <sub>2</sub>	54,0
Óxido de alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,0
Óxido de cálcio	CaO	7,8
Óxido de ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,7
Óxido de magnésio	MgO	3,6
Pentóxido de fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,6
Trióxido de enxofre	SO <sub>3</sub>	2,4
Óxido de potássio	K <sub>2</sub> O	2,1
Óxido de titânio	TiO <sub>2</sub>	1,3
Óxido de sódio	Na <sub>2</sub> O	0,8
Óxido de cromo	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4
Óxido de zinco	ZnO	0,3
Óxido de chumbo	PbO	0,2
Óxido de cobre	CuO	0,1
Cloreto		0,1
Óxido de manganês	MnO	0,1
Óxido de estrôncio	SrO	Tr
Óxido de níquel	NiO	Tr
Óxido de zircônio	ZrO <sub>2</sub>	Tr
Total		99,5

- Tr = traços (<0,1%)
- A espectrometria de raios X não detecta elementos com número atômico inferior ao do flúor ( H, Li, Be, B, C, N, e O) .

- Os resultados elementares obtidos diretamente na análise espectrométrica foram transformados para valores em óxidos totalizados em 99,5%.

### **5.3.1 Análise dos resultados da caracterização química**

A análise química realizada demonstra que as cinzas do Lodo incinerado à 800°C apresentam basicamente os mesmos compostos já verificados nas análises realizadas anteriormente, com diferentes temperaturas de incineração, nos Lodos provenientes da mesma ETE, apresentados no Capítulo 3 deste trabalho.

A presença de Cromo (Cr) e Chumbo (Pb), cujas concentrações ultrapassam respectivamente os limites de 0,01% e 0,1%, estabelecidos na NBR 10004 - Classificação de Resíduos Sólidos (ABNT, 1987) na sua Listagem 9 do Anexo I, podem indicar que esta amostra de material seja patogênica e perigosa, caso os mesmos sejam lixiviáveis ou solúveis no local de sua disposição.

A presença de Mercúrio e Chumbo nas análises químicas anteriormente realizadas com materiais do mesmo local, conforme pode ser observado na TABELA 3.2 do Capítulo 3, reforçam esta possibilidade.

Acredita-se que os metais pesados encontrados estão associados ao tipo de coleta utilizada em grande parte da cidade, mista, a qual conforme descrito no item 2.1, recebe contribuição tanto do esgoto cloacal como do pluvial. Este último traz consigo os poluentes depositados nas vias urbanas, que muitas vezes são compostos por este tipo de elementos químicos.

Quanto à composição química das cinzas em relação às obtidas em outra plantas brasileiras (SARDINHA e MORINGO, 1992) ou estrangeiras (ENDO et al., 1997), pode-se também afirmar que apresentam compostos semelhantes quantitativamente e qualitativamente, conforme pode ser observado na TABELA 3.3, onde são apresentados os principais componentes de cinzas de Lodo em ETES no Japão e na Alemanha. A patogenicidade e conseqüente periculosidade de Cinzas de Lodos Sanitário indicada pela presença de compostos patogênicos tem sido detectada em alguns Lodos de outros países,

conforme mostram os teores dos compostos de diversas cinzas japonesas (OKUNO et al., 1997) e alemãs (WIEBUSCH e SEYFRIED, 1997).

Não obstante, deve-se considerar que os valores apresentados na Listagem 9 do Anexo I da NBR 10004 (ABNT, 1987), segundo a norma “podem ser usados como parâmetros indicativos”, logo não é absoluto. Outrossim, considerando-se a precisão da análise química realizada e os baixíssimos teores encontrados, não se pode afirmar em definitivo a periculosidade deste resíduo, mas sim que a amostra em questão possui em sua composição compostos perigosos.

A análise dos compostos químicos da cinza, sobre a ótica da potencialidade de aproveitamento deste resíduo, mostra que o material apresenta altos teores de compostos semelhantes aos utilizados como adições ao concreto, como o dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de ferro, entre outros (MALHOTRA et al., 1987, SWAMY et al., 1986, entre outros).

MALHOTRA e MEHTA apud ASTM C 618 e BS 3892 (1996) indicam alguns requisitos de composição química para que um material possa ser utilizado como adição em materiais cimentícios. A ASTM C618 se refere somente a pozolanas naturais ou calcinadas, porém, conforme MALHOTRA e MEHTA (1996), as especificações podem ser aplicadas a novos materiais que estão sendo estudados.

A NBR 12653 – Norma Brasileira de Materiais Pozolânicos (ABNT, 1992) também estabelece exigências químicas para o aproveitamento de materiais como pozolânicos em adições cimentícias em concretos e argamassas. A TABELA 5.2 apresenta um comparativo entre as exigências químicas de diversas normas quanto ao uso de materiais pozolânicos.

TABELA 5.2– Requisitos químicos para uso de cinzas como pozolanas em cimento Portland (MALHOTRA e MEHTA, 1996 e NBR 12653 (ABNT, 1992))

<b>Características</b>	<b>BS 3892 (Reino Unido)</b>	<b>ASTM C 618 Classe F</b>	<b>ASTM C 618 Classe C</b>	<b>NBR 12653 Classe N</b>	<b>NBR 12653 Classe C</b>	<b>NBR 12653 Classe E</b>
Umidade máxima %	0,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
(SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), min.%	-	70,0	60,0	70,0	70,0	50,0
CaO, máx. %	10,0	-	-	-	-	-
SO <sub>3</sub> , máx. %	2,0	5,0	5,0	4,0	5,0	5,0
Perda ao fogo, % máx.				10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> ) - % máx.				1,5	1,5	1,5

Conforme estes requisitos, as Cinzas de Lodo Sanitários, nos aspectos ensaiados, apresentam-se dentro dos limites estabelecidos, pois o teor de SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> totaliza 77,7%, a quantidade de CaO é de 7,8% e de SO<sub>3</sub> de 2,4. Este último passa ligeiramente do recomendado pela BS 3892, mas atende as especificações da ASTM C 618 e da NBR 12653 para todas as classes.

Conforme MALHOTRA e MEHTA (1996), as pequenas diferenças na composição química entre diferentes tipos de adições não são, isoladamente, determinantes das propriedades do concreto, sendo estas influenciadas também por outras propriedades como as físicas e as morfológicas.

## **5.4 GRANULOMETRIA, MASSA ESPECÍFICA E SUPERFÍCIE ESPECÍFICA DAS CINZAS DE LODO**

Analisou-se a distribuição granulométrica das cinzas, a granulometria média e superfície específica através do ensaio de Granulometria por Raios Laser. Os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico de Engenharia Civil das Centrais Elétricas de FURNAS (FURNAS) em Goiás. A massa específica do material incinerado e destorroado também foi verificada de acordo com a NBR 9776 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco de Chapmann (ABNT, 1987), no Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

As cinzas foram analisadas em três formas diferentes: a primeira na granulometria obtida após a incineração, sendo uma amostra de 20 kg, destorroada por 30 minutos em um moinho de bolas, o qual possui um volume interno de 200 litros, é composto de 11 esferas de aço com 409 g cada bola; na segunda analisou-se o material, após destorroado no moinho de bolas pelo mesmo período, passante na peneira #200 e finalmente buscou-se um material mais fino, com finura semelhante às das adições minerais utilizadas no Brasil. Para obtenção desta última granulometria, 5 kg de cinza de Lodo material foram moídos no moinho de bolas por um período de 24 horas, a uma velocidade de 33 rotações por minuto (RPM).

### **5.4.1 Granulometria, massa específica e superfície específica da cinza incinerada e destorroada**

A massa específica do material foi de  $2,65 \text{ kg/dcm}^3$ .

O gráfico da FIGURA 5.1 apresenta a curva granulométrica obtida no ensaio de granulometria por raios laser.

O diâmetro médio do material incinerado apresentou o valor de  $33,54 \mu\text{m}$ . Observa-se que as dimensões das partículas são muito variadas, desde  $3,38 \mu\text{m}$  até  $241,40 \mu\text{m}$ .

A superfície específica foi de  $253,4 \text{ m}^2/\text{kg}$  ( $2534 \text{ cm}^2/\text{g}$ ).

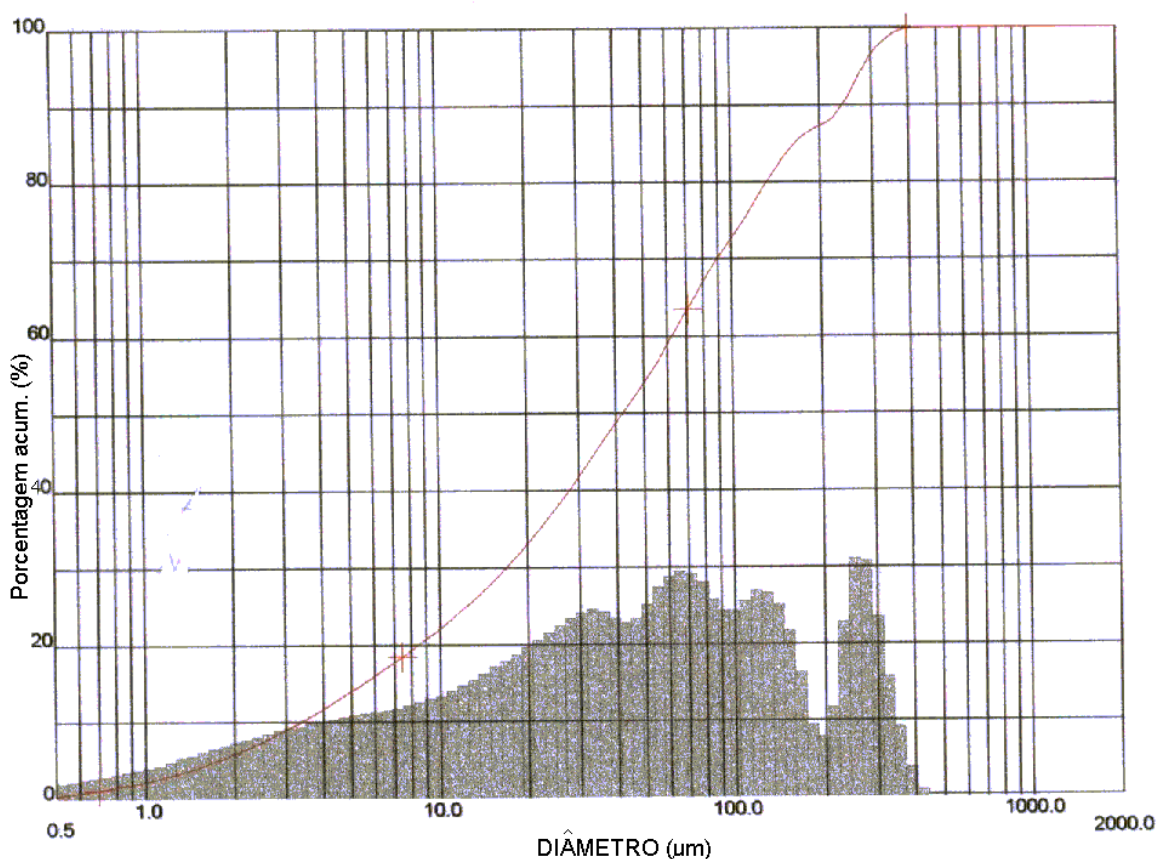


FIGURA 5.1 Curva granulométrica da Cinza de Lodo incinerado e destorreado

#### 5.4.2 Granulometria e superfície específica da cinza incinerada e peneirada na peneira #200

O gráfico da FIGURA 5.2 apresenta a curva granulométrica obtida no ensaio de granulometria por raios laser.

O diâmetro médio do material incinerado passante na peneira #200 apresentou o valor de 19,31  $\mu\text{m}$ . Observa-se que as dimensões das partículas vão desde 2,84  $\mu\text{m}$  até 81,51 $\mu\text{m}$ .

A superfície específica foi de 831,0  $\text{m}^2/\text{kg}$  (8310  $\text{cm}^2/\text{g}$ ).



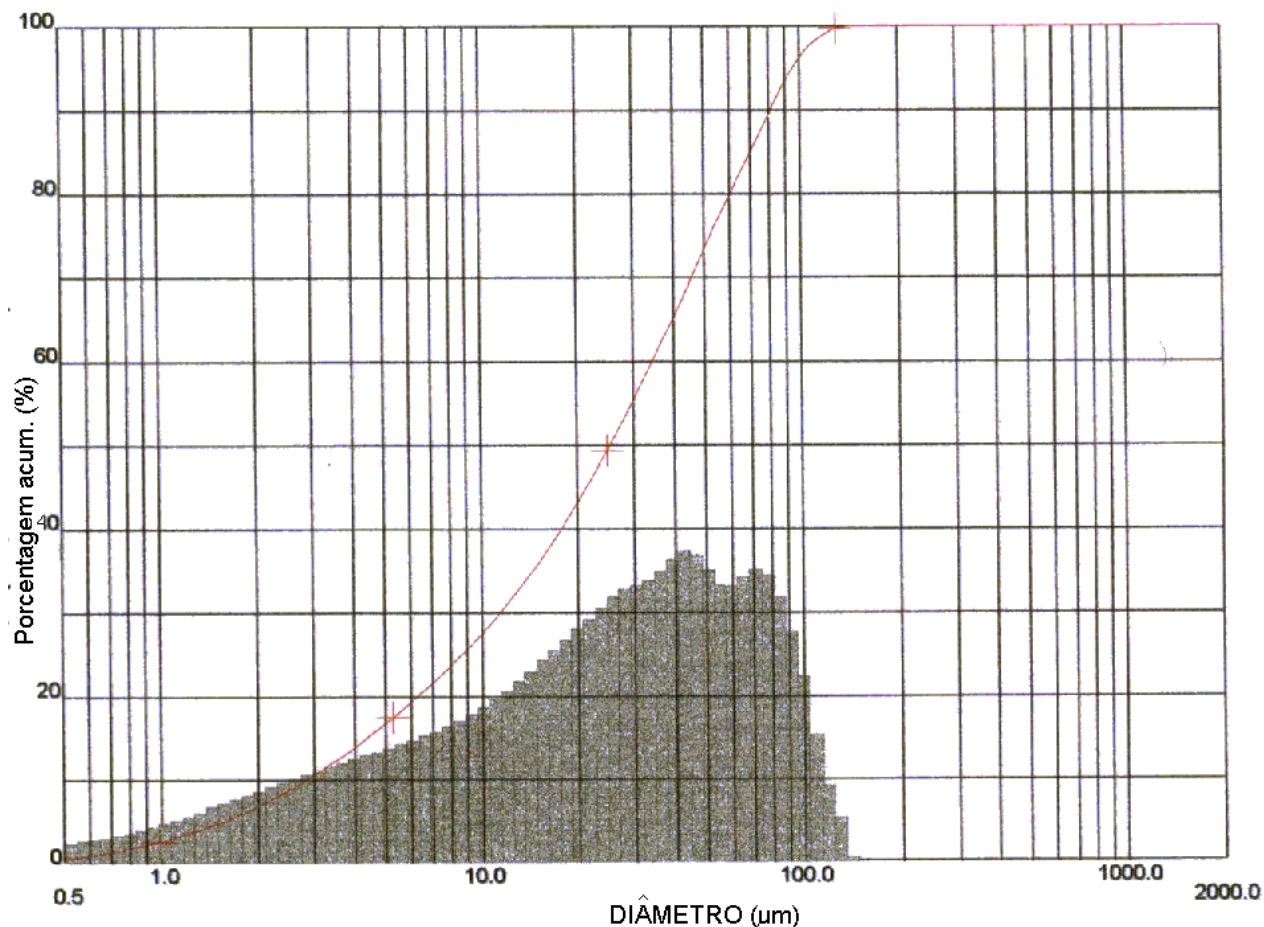


FIGURA 5.2 Curva granulométrica da cinza da Lodo peneirada na peneira #200

#### 5.4.3 Granulometria e superfície específica da cinza incinerada e moída por 24h em moinho de bolas

O gráfico da FIGURA 5.3 apresenta a curva granulométrica obtida no ensaio de granulometria por raios laser.

O diâmetro médio do material incinerado e moído em moinho de bolas por 24 horas e apresentou o valor de 10,42  $\mu\text{m}$ . As partículas apresentaram dimensões entre 1,40  $\mu\text{m}$  até 56,12  $\mu\text{m}$ .

A superfície específica foi de 1363  $\text{m}^2/\text{kg}$  (13636  $\text{cm}^2/\text{g}$ ).

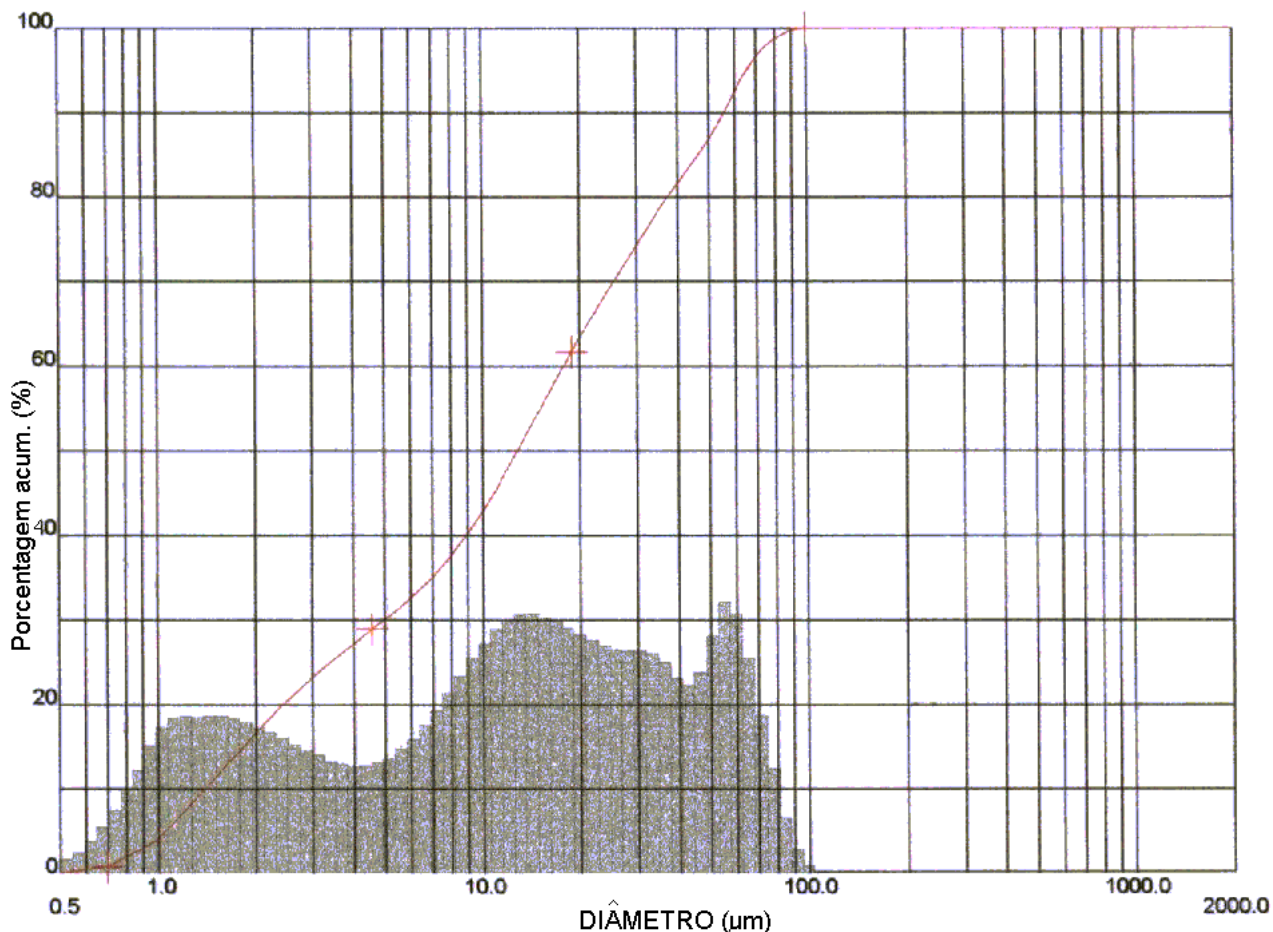


FIGURA 5.3 Curva granulométrica da cinza da Lodo moída em moinho de bolas por 24h

#### 5.4.4 Análise dos resultados da granulometria, superfície específica e massa específica

Conforme MALHOTRA e MEHTA (1996), os mecanismos determinantes da influência das adições no concreto fresco ou endurecido dependem, além da composição química, do tamanho, forma e textura das partículas. O consumo de água e a trabalhabilidade são, por exemplo, controlados pela distribuição granulométrica, pelo efeito de empacotamento, suavidade e textura das partículas. Já as propriedades cimentíceas e

pozolânicas, que conferem resistência e baixa permeabilidade ao concreto, são controladas, além dos fatores citados, pelas características mineralógicas.

A TABELA 5.3 apresenta as exigências da NBR 12653- Materiais Pozolânicos (ABNT, 1992) quanto à granulometria dos materiais para serem classificados como pozolânicos, os valores encontrados para as diferentes granulometrias de cinzas analisadas e valores encontrados por MEHTA (1985) em materiais pozolânicos nos EUA.

TABELA 5.3 Características quanto à granulometria de diferentes adições.

Material	Percentual de material retido na peneira de 45 $\mu$ m (%)	Superfície específica (m <sup>2</sup> /kg)
Exigência da NBR 12653	≤ 34%	-
Cinza de Lodo incinerada	58%	253,4
Cinza de Lodo passante na peneira # 200	31%	831,0
Cinza de Lodo finamente moída	17%	1363,0
Resultados obtidos por MEHTA (1985) em diversas pozolanas nos EUA	15%	300 a 400

Analisando-se as cinzas ensaiadas, exclusivamente sob esta ótica, pode-se afirmar que a cinza incinerada simplesmente destorroada não atende ao requisito da norma, enquanto a peneirada e a finamente moída atendem. No entanto estes resultados não podem ser considerados definitivos quanto ao aproveitamento do material.

No caso da cinza moída o percentual é próximo ao encontrado por MEHTA (1985) em materiais pozolânicos estudados nos EUA.

No caso da massa específica da cinza (2,65 kg/dm<sup>3</sup>) pode-se dizer que apresenta-se inferior à dos cimentos, os quais, segundo ALVES (1999), tem valores médios da ordem de 3,15 kg/dm<sup>3</sup>) e próxima à massa específica das areias utilizadas como agregados miúdos em concretos.

## 5.5 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

A Difractometria de Raios X foi realizada com o objetivo de melhor identificar a composição das cinzas, especialmente quanto à forma com que se apresentam, seja ela amorfa ou cristalina. Esta análise auxilia na avaliação da atividade pozolânica do material, indicando, caso o material seja cristalino, baixa atividade e caso apresente-se amorfo, maior potencial pozolânico.

As pozolanas naturais possuem alta atividade devido a serem compostas por aluminossilicatos amorfos. Análises em várias pozolanas do Japão, EUA, México e Grécia, mostram que estas são compostas de 80 a 90% de material amorfo. As cinzas volantes normalmente possuem de 50 a 90% de material amorfo (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

As partículas cristalinas, como quartzo, mulita, hematita, anidrita, entre outras, não possuem alta atividade pozolânica.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em equipamento da SIEMENS – D 5000 com goniômetro  $\theta - \theta$ . A radiação  $ek\alpha$  em tubo de cobre nas condições 40 kv e 30 mA. A velocidade e intervalo de varredura do goniômetro para cada tipo de análise é a seguinte para a amostra do pó: 1,5 segundos para  $0,025^\circ$  de grau de  $2^\circ$  a  $72^\circ 2\theta$ .

O método utilizado foi o chamado Método do Pó ou também conhecido como análise total, onde todos os minerais ou estruturas cristalinas são analisadas.

Na amostra em pó, cerca de 1g do material pulverizado ou desagregado é depositado em um sulco na lâmina de vidro, procurando-se preservar a desorientação das partículas e então colocada no equipamento para o ensaio (HASPARK, 1999).

A identificação dos compostos da amostra da cinza foi realizada através de um software específico que possui uma série de 18000 padrões de minerais, elementos e compostos catalogados.

O equipamento utilizado detecta com maior precisão os compostos cristalinos com teores na amostra a partir de 5%.

### 5.5.1 Resultados obtidos

O difratograma da amostra consta na FIGURA 5.4 e nele é possível identificar os seguintes compostos na cinza de Lodo Sanitário:

- SiO<sub>2</sub>, na forma de quartzo, sendo o mais presente;
- Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- Albita (feldspato)
- Microcline (feldspato)
- Magnetita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- Rodocrosita (carbonato de manganês)
- Talco (magnésio, silício e alumínio)

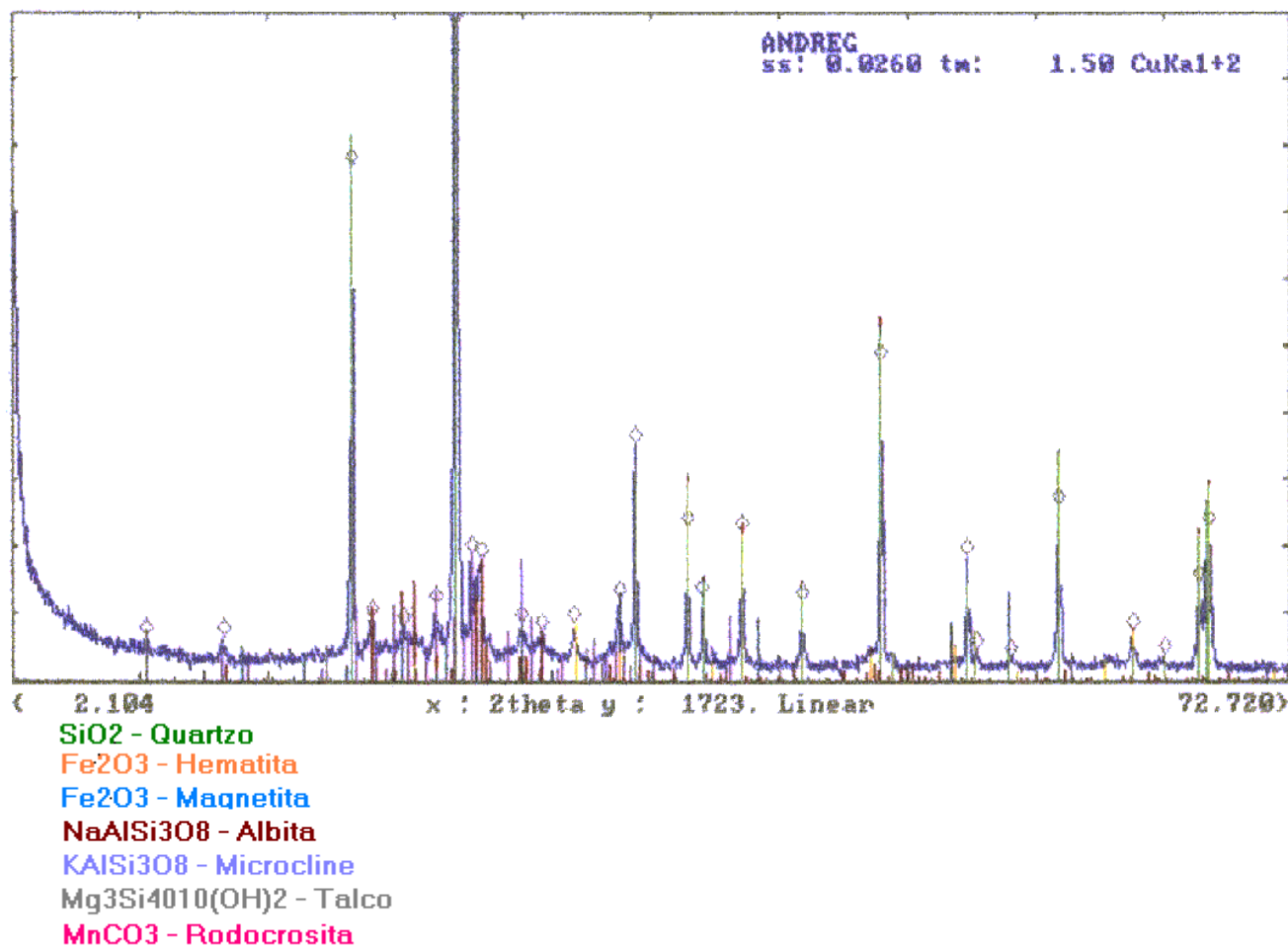


FIGURA 5.4 Difractometria de Raios X realizada na amostra de Cinza de Lodo Sanitário.

### 5.5.2 Análise dos resultados da difração de raio X

Os materiais amorfos se caracterizam por apresentarem curvas com formas doméricas ou abauladas. Como no difratograma na FIGURA 5.4 predominaram as formas agudas ou picos agudos, pode-se afirmar que o material é predominantemente cristalino. Não se pode, no entanto, descartar a presença de compostos amorfos na amostra.

O resultado obtido no ensaio mostrou ser o material constituído principalmente por quartzo e feldspatos, o que é evidenciado pela intensidade das reflexões observadas.

Pelo método do pó identifica-se mineralogicamente o quartzo, representado pela sílica, e os feldspatos, representados pelo microclinio e albita, em grandes proporções. Óxidos de ferro na forma de magnetita e magnemita também são identificados em menor proporção.

Os compostos identificados na difratometria coincidem com os elementos identificados na análise química da Cinza do Lodo, apresentada no item 5.3 e também correspondem aos encontrados na difratometria realizada na mesma Cinza, incinerada a 550°C, realizada por GEYER, RECENA e SHULER (1995), apresentada no Capítulo 3.

Como o limite de detecção do equipamento utilizado para o ensaio é para compostos que se apresentem na amostra em teores acima de 5% e mudanças nas temperaturas de incineração para obtenção das cinzas influenciam muito quanto à forma como estas se apresentam ( cristalinas ou amorfas), podem ser justificadas as diferenças entre esta análise e a anteriormente realizada, conforme FIGURA 3.1 do Capítulo 3, a qual havia sido obtida à temperatura de 550 ° C.

A não identificação, por exemplo, do cálcio na presente análise, o qual havia sido detectado na difração apresentada no Capítulo 3 (item 3.1.3) e também apresenta-se na análise química deste material, pode ter ocorrido devido ao fato do equipamento utilizado para a difração detectar somente compostos com teores acima de 5%. Considerando ainda que o teor encontrado na análise química é próximo a este e que, parte deste composto pode estar sob amorfa, pode-se aceitar a não identificação do cálcio na difração.

## 5.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A fim de se conhecer melhor a morfologia das partículas que compõem o resíduo do Lodo incinerado e a microestrutura do material, procedeu-se a uma análise em microscópio eletrônico de varredura por elétrons secundários.

Estes estudos foram realizados nos Laboratórios do Centro de Engenharia Civil das Centrais Elétricas de Furnas (FURNAS).

Este tipo de análise permite visualizar em três dimensões o aspecto do material, em aumentos de até 20000 vezes. Também com a microsonda ou microanálise (EDS) pode-se verificar pontualmente os componentes químicos presentes.

Foram preparadas amostras da cinza destorroada por 30 minutos no moinho de bolas, utilizando-se os procedimentos utilizados pelo Centro Tecnológico de Engenharia Civil das Centrais Elétricas de FURNAS (HAWSPARYK, 1999; PADILHA e AMBRÓSIO FILHO).

Para preparo da amostra coleta-se 15mg da cinza, coloca-se num copo de Becker com 30ml de xilol (solvente à base de álcool), procedimento este realizado em capela. Este procedimento é adotado para se fazer uma melhor dispersão da amostra. Após, com auxílio de uma pipeta, coleta-se o material e coloca-se no porta amostra. Depois disso submete-se o material a uma secagem em estufa a uma temperatura de 60° C a fim de remover o solvente. Finalmente procede-se a metalização, que consiste no revestimento da superfície da amostra com uma liga de ouro por um período de 30 segundos. Após o porta amostra é colocado dentro do microscópio eletrônico de varredura para se proceder o ensaio.

Foram registrados alguns detalhes das características morfológicas do material, que são apresentados nas Fotos 5.3 a 5.7., tomadas em diversos níveis de aumento, para uma visualização completa tanto do aspecto geral das partículas como de detalhes particulares de algumas.

A microanálise através do EDS também foi realizada em três pontos de uma das imagens da amostra.

### 5.6.1 Resultados obtidos

As Fotos 5.3 a 5.7 representam, respectivamente, ampliações de 500x, 1000x, 3500x, 10000x e 15000x de uma imagem da amostra e as Fotos 5.8 e 5.9 ampliações de 1500x e 12000x de outra imagem da mesma amostra.

Os gráficos da FIGURAS 5.5, 5.6 e 5.7 mostram os gráficos da microanálise realizada nos 3 pontos indicados nas Fotos 5.5 e 5.6.

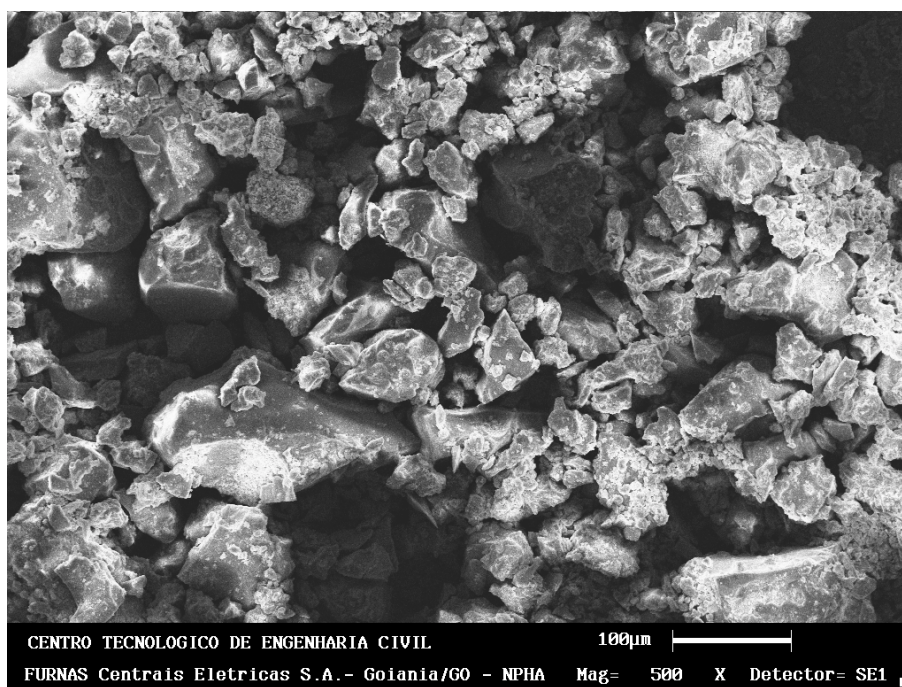


FOTO 5.3 Microscopia eletrônica de varredura nas cinzas de Lodo incineradas à 800°C na ampliação de 500 vezes.



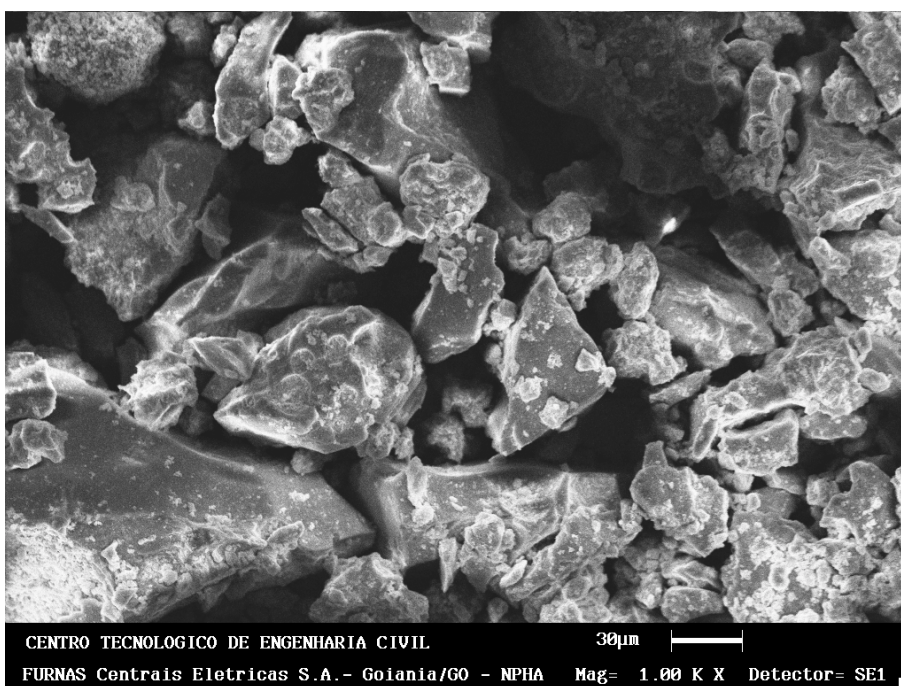


FOTO 5.4 Microscopia eletrônica de varredura nas cinzas de Lodo incineradas à 800°C na ampliação de 1000 vezes.

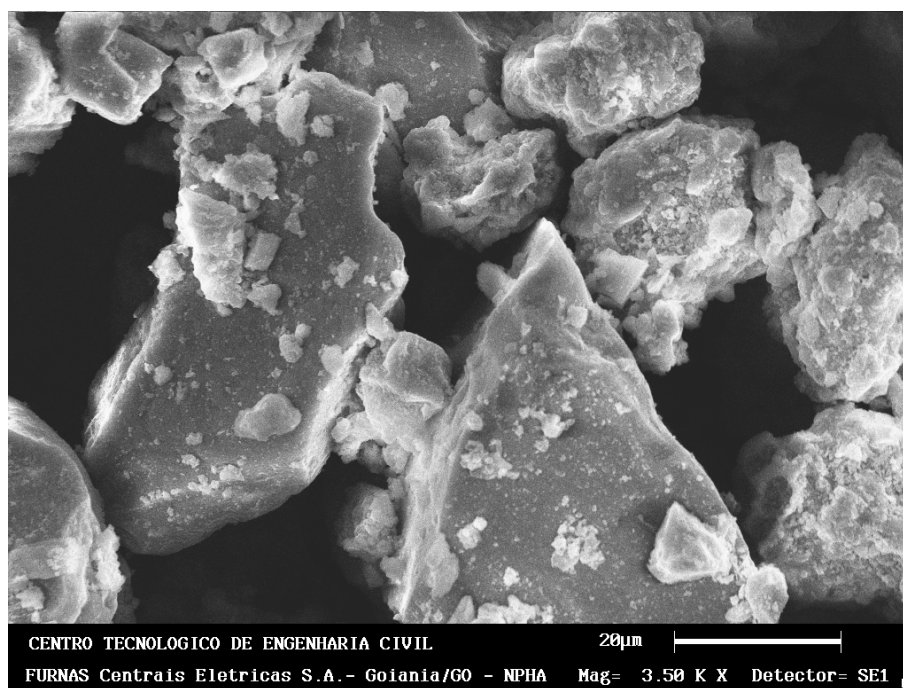


FOTO 5.5 Microscopia eletrônica de varredura nas cinzas de Lodo incineradas à 800°C na ampliação de 3000 vezes.

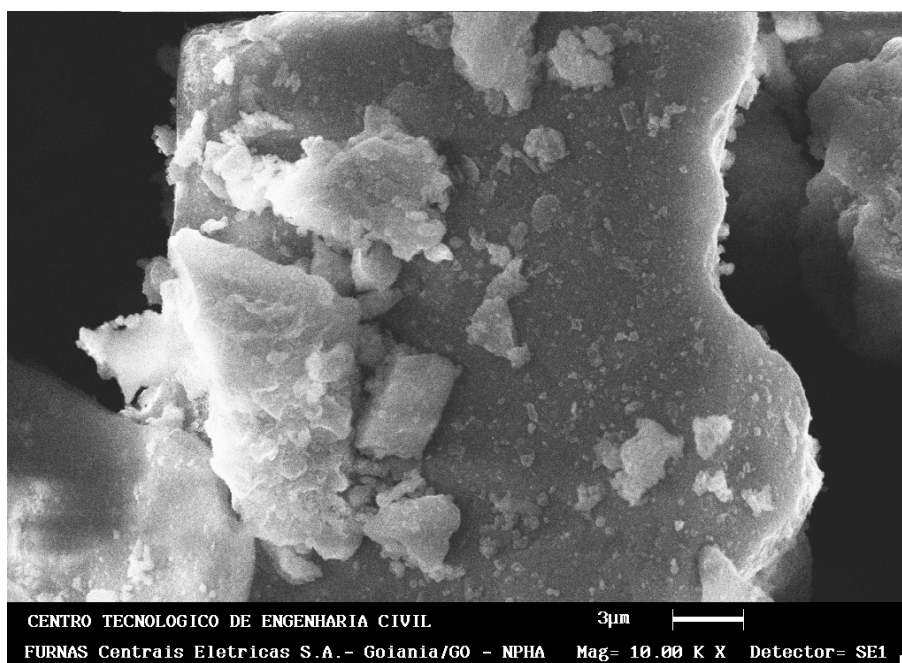


FOTO 5.6 Microscopia eletrônica de varredura nas cinzas de Lodo incineradas à 800°C na ampliação de 10000 vezes

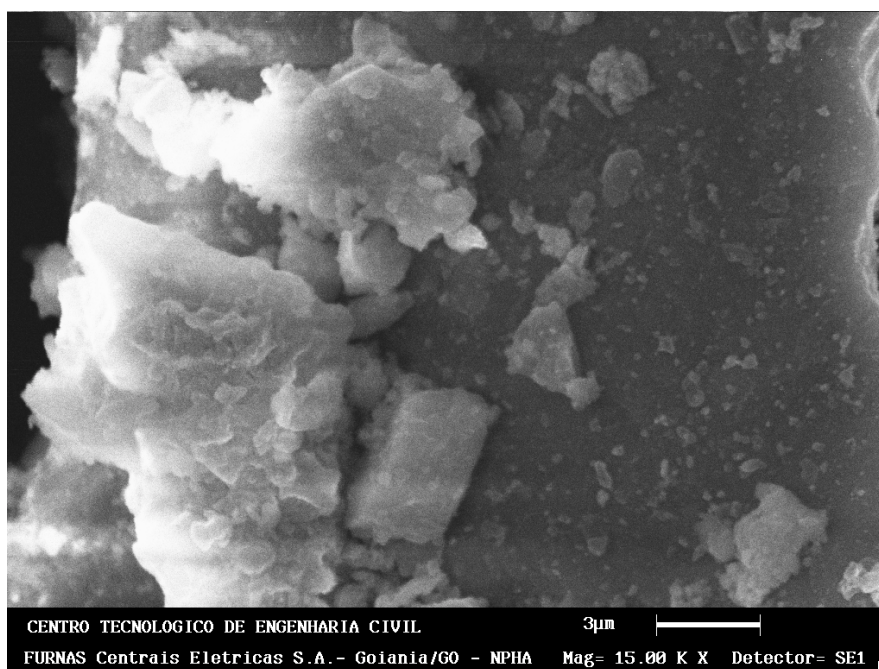


FOTO 5.7 Microscopia eletrônica de varredura nas cinzas de Lodo incineradas à 800°C na ampliação de 15000 vezes.

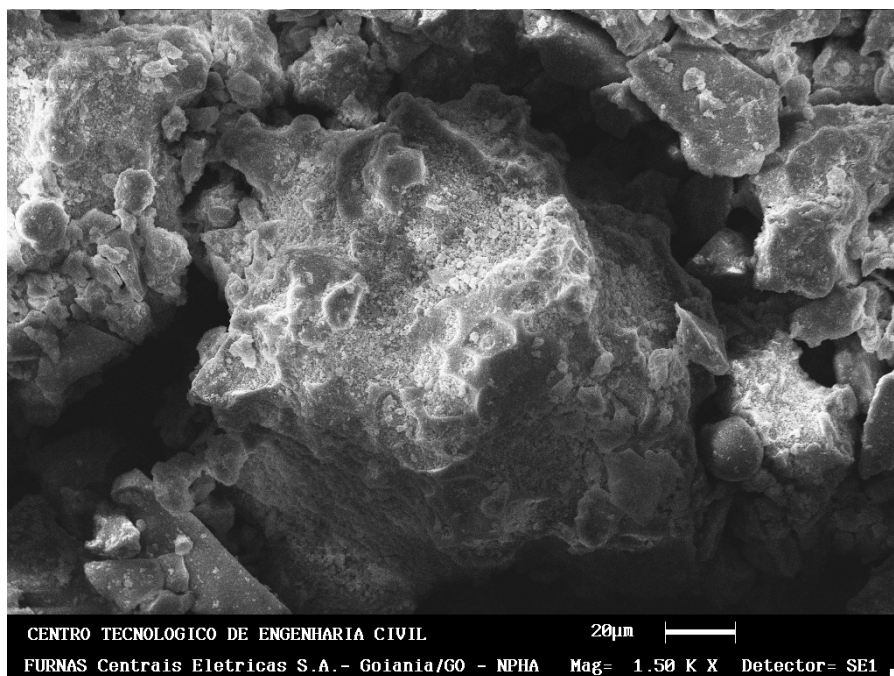


FOTO 5.8 Orifícios nas partículas de maior dimensão preenchidos por materiais finos em ampliação de 1500x na microscopia eletrônica de varredura

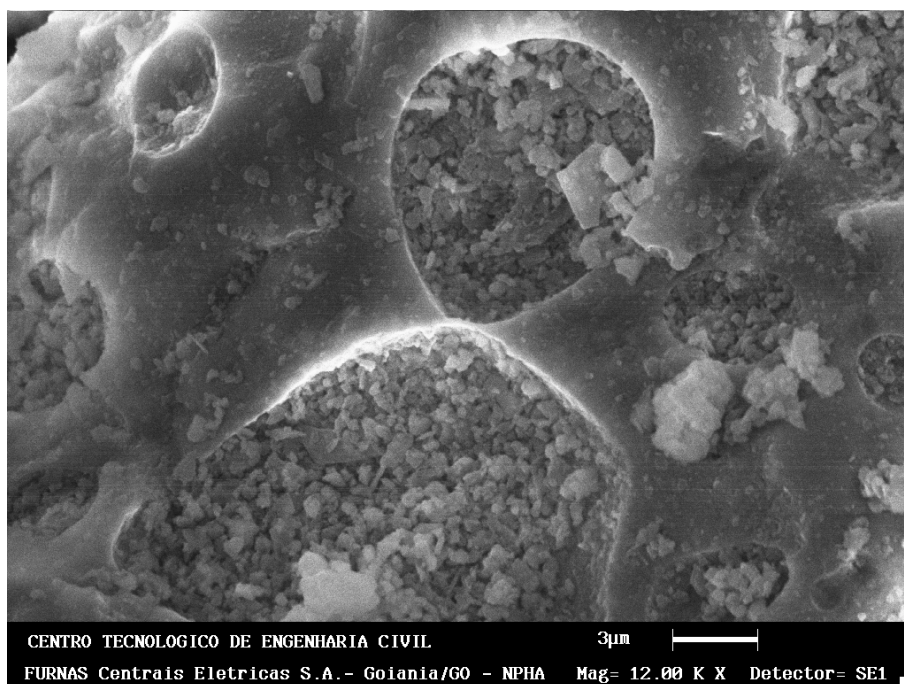


FOTO 5.9 Orifícios nas partículas de maior dimensão preenchidos por materiais finos em ampliação de 12000x na microscopia eletrônica de varredura.

### 5.6.2 Análise dos resultados da Microscopia eletrônica

Conforme PINTO (2000), o formato dos grãos tem muita importância no comportamento mecânico, pois determina como eles se encaixam e se entrosam. Além disto indica como eles deslizam entre si quando solicitados por forças externas.

Nas microscopias eletrônicas apresentadas nas Fotos 5.1 e 5.2 observa-se a forma geral das partículas que compõem as cinzas, as quais apresentam baixa esfericidade e médio arredondamento, isto é, as dimensões das partículas, segundo os três eixos, parecem ser diferentes e na maioria dos grãos os cantos são suaves.

As partículas das cinzas mostram ter um formato mais angular do que arredondado, o que as torna mais suscetíveis a se quebrarem (PINTO, 2000).

Pode-se identificar, pela escala fornecida pelas Fotos 5.3 e 5.4, a ordem de grandeza da granulometria das partículas, a qual visualmente confirma os resultados dos ensaios de granulometria apresentado no item 5.4.1. Visualiza-se grãos bem definidos desde 10  $\mu\text{m}$  até aproximadamente 200  $\mu\text{m}$ . Estes grãos maiores de formas definidas, semelhantes a grãos de areia, tem sobre si depositados grãos menores, aglomerados em forma de um pó, com dimensões muito menores, o que pela Foto 5.6 pode-se estimar possuírem dimensões próximas a 3  $\mu\text{m}$ .

Nas ampliações de 3500x e 10000x, apresentadas nas Fotos 5.3 e 5.4, pode-se observar com maior nitidez o formato dos grãos maiores. Nestas ampliações pode-se ver com clareza as partículas menores depositadas em forma de aglomerados ou pó.

Na Foto 5.5, correspondente à ampliação de 15000x, confirma-se a deposição de partículas menores, sem formas definidas, sobre o grão maior.

Nas Fotos 5.6 e 5.7 um outro ponto da mesma amostra é focalizado. Na ampliação de 12000x observa-se que o grão maior apresenta orifícios na sua superfície, também preenchido por partículas mais finas em forma de pó.

Para identificar os compostos encontrados na microscopia, utilizou-se a microanálise, realizada através da microsonda (EDS).

Focalizou-se um grão maior e os materiais finos nele depositados, o que constituiu-se de característica geral de todas as microscopias realizadas.

A microanálise foi realizada em 3 pontos, localizados conforme estão indicados nas Fotos 5.5 e 5.6 e cujos resultados são apresentados nas FIGURAS 5.5, 5.6 e 5.7.

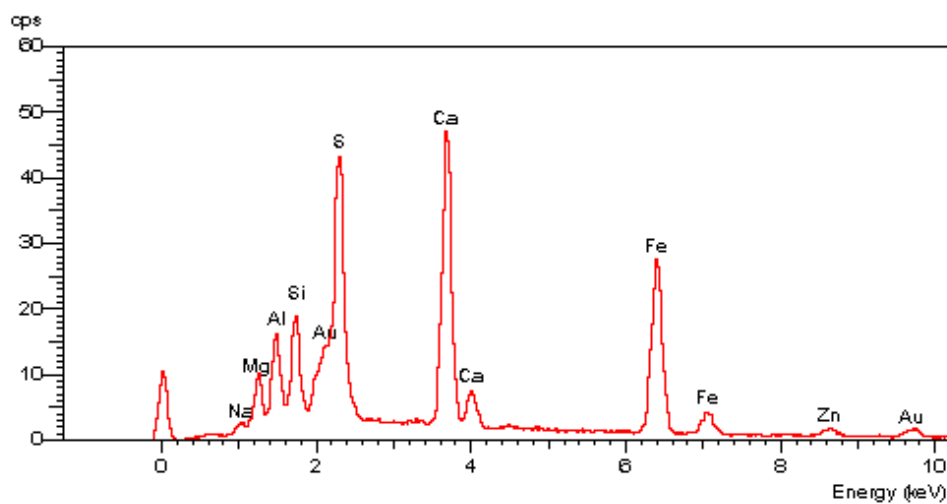


FIGURA 5.5 Compostos encontrados com a micranálise (EDS) no ponto 1 indicado nas Fotos 5.6 e 5.7

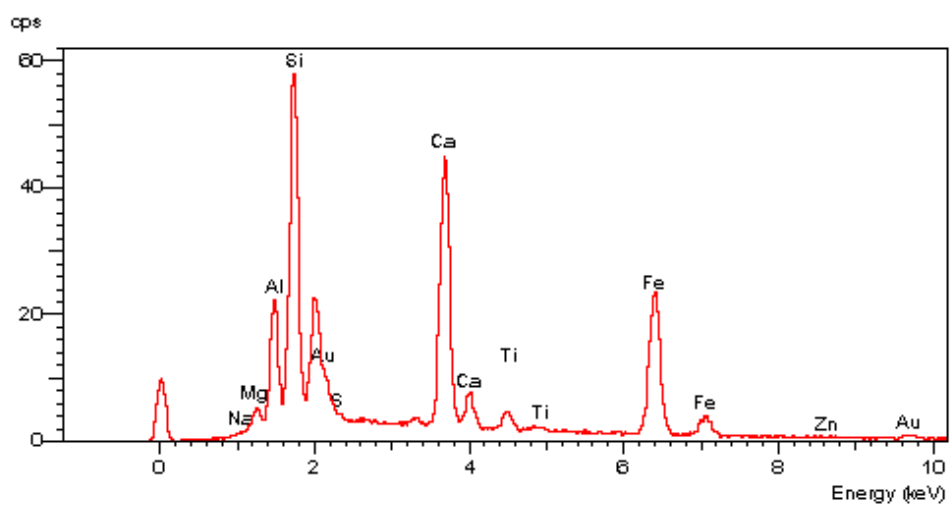


FIGURA 5.6 Compostos encontrados com a microanálise (EDS) no ponto 2 indicado nas Fotos 5.6 e 5.7.

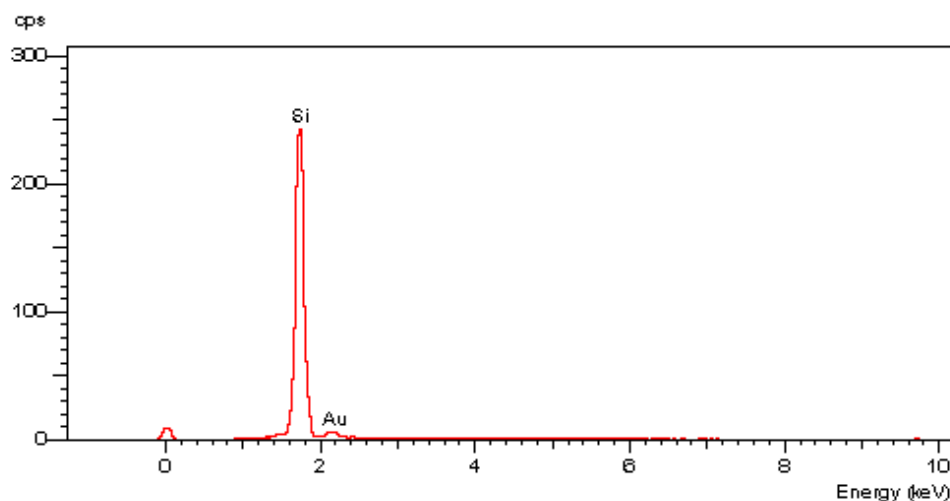


FIGURA 5.7 Gráfico com os compostos encontrados com a microanálise (EDS) no ponto 3 indicado nas Fotos 5.6 e 5.7.

O primeiro e o segundo pontos analisados foram sobre o aglomerado de partículas finas depositadas sobre o grão maior. O terceiro ponto analisado foi sobre a superfície do grão maior.

No primeiro ponto pode-se identificar, através da FIGURA 5.5, que o aglomerado de partículas muito finas depositadas sobre o grão maior constitui-se de diversos compostos químicos e não somente de um único material. Encontram-se o sódio, magnésio, alumínio, sílica, enxofre, potássio, cálcio, titânio, ferro e zinco. Além disto, pode-se observar na FIGURA 5.5 que aparece no gráfico também um pico de ouro (Au), o qual é proveniente da metalização realizada na amostra, como procedimento inicial do ensaio.

No segundo ponto, que visualmente constitui-se em uma menor quantidade de materiais aglomerados, aparecem praticamente os mesmos compostos da primeira microsondagem, com exceção do sódio, enxofre e zinco.

No terceiro ponto, que foi sobre o grão principal, identifica-se somente a presença de sílica.

As microanálises (EDS) realizadas confirmam a composição química anteriormente estabelecida para as cinzas.

Analisando-se os resultados do EDS apresentados pode-se observar que os grãos maiores da cinza de Lodo, conforme indica o gráfico da FIGURA 5.7, são de  $\text{SiO}_2$ , com características conforme a microscopia indica de grãos de quartzo. Já os materiais finos depositados sobre os grãos maiores são formados por vários compostos além da sílica.

Estes grãos finos conforme pode-se verificar nas Fotos 5.6 e 5.7 possuem dimensões muito menores que os grãos maiores, estando em uma escala aproximada entre 3  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ .

A TABELA 5.4 apresenta a composição química de cada microanálise com os respectivos percentuais de cada composto encontrado em cada ponto sondado.

TABELA 5.4 Compostos encontrados na microanálise (EDS) realizada na microscopia eletrônica da cinza de Lodo

Composição Química		Microanálise nos grãos depositados sobre o maior (FIGURA 5.5) (%)	Microanálise nos grãos depositados sobre maior (FIGURA 5.6) (%)	Microanálise no grão maior da cinza (FIGURA 5.7) (%)
Óxido de sódio	$\text{Na}_2\text{O}$	0,4		
Óxido de magnésio	$\text{MgO}$	1,0	1,0	
Óxido de alumínio	$\text{Al}_2\text{O}_3$	7,5	13,5	
Dióxido de silício	$\text{SiO}_2$	8,0	36,0	100
Trióxido de enxofre	$\text{SO}_3$	19,8		
Óxido de potássio	$\text{K}_2\text{O}$		0,1	
Óxido de cálcio	$\text{CaO}$	35,0	29,2	
Óxido de titânio	$\text{TiO}_2$		1,7	
Óxido de ferro	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	24,3	18,5	
Óxido de zinco	$\text{ZnO}$	1,0		



## 5.7 ENSAIO DE POZOLANICIDADE NAS CINZAS OBTIDAS À 800°C

Com o objetivo de se conhecer o comportamento da Cinza de Lodo Sanitário, com relação a sua atividade pozolânica, realizou-se no Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (LMC/EEC/UFG) o ensaio da NBR 5752 – Determinação do Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland (ABNT, 1977).

O ensaio de Determinação do índice de atividade pozolânica possibilita verificar a reatividade de um material para fins de seu uso como adição ao cimento ou a concretos.

Como neste trabalho estuda-se o aproveitamento das cinzas de Lodos obtidas em incineradores de temperatura fixada em 800°C, que será o padrão para as ETES da cidade de Porto Alegre, não foram aqui analisados materiais calcinados a outras temperaturas.

A única variável que poderia ser alterada, no sentido verificar sua influência na atividade pozolânica do material, seria a granulometria. Desta forma decidiu-se analisar as cinzas de Lodo incineradas e destorroadas, as cinzas peneiradas na peneira #200 da ABNT e também as moídas em moinho de bolas por 24 h.

As três cinzas adotadas para este ensaio foram caracterizadas quanto à granulometria nos itens 5.4.2, 5.4.3 e 5.4.4.

Conforme a NBR 5752 (ABNT, 1977), na determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland são moldadas duas séries de três corpos-de-prova cilíndricos 5x10cm. Uma dessas séries é moldada com cimento Portland, água e areia normal e é chamada de argamassa A. Na outra série, parte do volume absoluto desse cimento (35%) é substituído pela pozolana, chamada de argamassa B.

Após moldagem, todos os corpos-de-prova são conservados em câmara úmida durante 28 dias, em recipientes hermeticamente fechados, quando são removidos, rematados e rompidos de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1982).

O índice de atividade pozolânica com cimento Portland é definido como sendo a relação, em porcentagem, entre a resistência média a 28 dias dos corpos-de-prova moldados com pozolana e cimento Portland (argamassa B) e a resistência média, também aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com cimento Portland (argamassa A).

### 5.7.1 Resultados do ensaio de pozolanicidade

Na TABELA 5.5 apresentam-se os resultados dos ensaios realizados com base na NBR 5752.

TABELA 5.5 – Índice de atividade pozolânica das cinzas incineradas à 800°C.

<b>Material</b>	<b>Granulometria média</b>	<b>Índice de Pozolanicidade (%)</b>
Cinzas incineradas a 800°C	33,54µm	73,74%
Cinzas incineradas a 800°C e peneiradas	19,31µm	72,2%
Cinzas incineradas a 800°C e moídas 24 h	10,42µm	76,24%

### 5.7.2. Análise dos resultados do ensaio de pozolanicidade

Observa-se que a redução da granulometria das cinzas, a valores próximos a outros materiais, de semelhante constituição química, considerados como pozolânicos, para este material não trouxe benefícios significativos quanto ao aumento de sua atividade pozolânica.

Prováveis explicações para os resultados de pozolanicidade podem estar relacionadas com dois fatores: primeiro, o material não apresenta elevada reatividade e portanto a redução da sua granulometria aos níveis realizados pode não ter sido significativa; segundo pode-se levantar a hipótese de que os grãos menores da cinza, que encontram-se sobre os maiores, não foram atingidos pelo peneiramento ou pela moagem e

portanto a redução de tamanho dos grãos de maiores, supostamente de quartzo cristalino, não interferiu significativamente no aumento desta propriedade.

Com estes ensaios pode-se concluir que a moagem ou o peneiramento, que tem custos elevados, possuem pouca eficácia e portanto não interessante de serem adotadas.

A pozolanicidade das cinzas obtidas em incineradores de escala real à temperatura de 800°C foi maior do que a obtida nas cinzas calcinadas a 550°C (peneiradas na #200), por GEYER, DAL MOLIN e CONSOLI (1998), que foi de 58%. Isto demonstra que a temperatura de 800° C e/ou a granulometria menor deste material, podem ter influenciado favoravelmente à pozolanicidade da cinza.

Conforme MALHOTRA e MEHTA (1996), a determinação do índice de atividade de uma adição pode ser feita por vários métodos acelerados ou não, por isto deve-se ter cuidado em comparar diretamente os valores apresentados por diferentes métodos ou estabelecidos por diferentes normas.

A Norma Britânica se baseia na substituição de 30 % do cimento, já a Canadense, a da ASTM e a brasileira em 35%.

A TABELA 5.6. apresenta os índices de atividade pozolânica mínimos exigidos pela NBR 12653 – Materiais Pozolânicos (ABNT, 1992) para que o material possa ser utilizado como adição pozolânica no cimento ou no concreto.

TABELA 5.6 Índice de atividade pozolânica mínimo para uso como adição ao cimento Portland.

	Norma Brasileira NBR 12653 (ABNT, 1992)		
	Classe N	Classe C	Classe E
Índice de atividade pozolânica	75%	75%	75%

A potencialidade de aproveitamento das cinzas de Lodo como adição ao concreto, quanto à pozolanicidade, não pode ser descartada tendo em vista que o valor apresentado deste índice está muito próximo ao estabelecido nas normas de Cimento Portland

Composto – NBR 11578 (ABNT, 1991) e Materiais Pozolânicos – NBR 12653 ( ABNT, 1992), que preconizam que a atividade do material pozolânico utilizado como adição deve ser no mínimo de 75%.

## **5.8 CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL DAS CINZAS**

Com o objetivo de Classificar a Cinza de Lodo Sanitário utilizada neste trabalho, conforme as diretrizes da NBR-10004 – Resíduos Sólidos – Classificação (ABNT, 1987), procedeu-se, além da análise química da cinza, apresentada no item 5.1 deste capítulo, aos Ensaios de Solubilização de Resíduos NBR 10006 (ABNT, 1987) e Lixiviação de Resíduos – NBR 10005 (ABNT, 1987) .

Estes testes são também os recomendados pela Agência Americana de Proteção Ambiental (EPA, 1982), pela Agência Japonesa de Meio Ambiente (JEA, 1996) e pelas normas Holandesas de Meio Ambiente (HOLLAND,1991) para análise e classificação de resíduos.

As amostras para os ensaios foram obtidas com base na NBR 10007 – Amostragem de Resíduos – Procedimento (ABNT, 1987).

A NBR 10004 classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que estes possam ter manuseio e destinação adequados.

Para efeito de classificação a NBR 10004 estabelece 3 classes:

- Resíduos classe I – perigosos;
- Resíduos classe II – não inertes;
- Resíduos classe III- inertes.

Os resíduos perigosos são aqueles que apresentam risco à saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade ou incidência de doenças. e/ou riscos ao meio ambiente, quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada. Além disto os resíduos podem ser classificados como perigosos se

apresentarem uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou Patogenicidade.

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 1987), os resíduos inertes são aqueles que submetidos ao teste de solubilização de resíduos conforme a NBR 10006 (ABNT, 1987), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, conforme estabelece a listagem 8, do Anexo H, desta norma.

Os resíduos não inertes são aqueles que não se enquadram nas características dos perigosos ou dos inertes. Podem ter propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

### **5.8.1 Solubilização da Cinza de Lodo Sanitário**

Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 10006 – Solubilização de Resíduos (ABNT, 1987), no Laboratório de Ensaio Ambientais da UFRGS.

O objetivo deste ensaio é diferenciar os resíduos das Classes II e III, isto é, investigar se o resíduo é inerte ou não inerte.

Os parâmetros para esta classificação constam na NBR 10004 – Resíduos Sólidos, no item 4.3 e na Listagem número 8 do Anexo H desta norma. Esta listagem apresenta os padrões máximos admitidos para que os resíduos sejam classificados como inertes.

Na TABELA 5.7 apresentam-se os resultados do ensaio realizado de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 1987) e os padrões máximos da NBR 10004 (ABNT, 1987).

TABELA 5.7 - Resultados do Teste de Solubilização e os padrões da NBR 10004

Determinações	Cinza de Lodo (mg/l)	Padrões para o teste de Solubilização NBR 10004 (mg/l)
<b>S- SO<sub>4</sub></b>	<b>523,0</b>	<b>400,0</b>
<b>Cobre</b>	0,04	1,0
<b>Zinco</b>	0,02	5,0
<b>Ferro</b>	0,03	0,3
<b>Manganês</b>	0,01	0,1
<b>Sódio</b>	16,0	200,0
<b>Alumínio</b>	<b>0,28</b>	<b>0,2</b>
<b>Fluoreto</b>	<b>2,2</b>	<b>1,5</b>
<b>Cádmio</b>	<b>0,01</b>	<b>0,005</b>
<b>Chumbo</b>	<b>0,09</b>	<b>0,050</b>
<b>Cromo</b>	0,02	0,050
<b>Bário</b>	1,00	1,0
<b>Prata</b>	0,02	0,05
<b>Cloreto</b>	56,00	250,0
<b>Mercúrio</b>	0,0005	0,001
<b>Fenol</b>	0,010	0,010
<b>N-NO<sub>3</sub> + N- NO<sub>2</sub></b>	0,9	10,0
<b>Dureza CaCO<sub>3</sub></b>	<b>1811</b>	<b>500,0</b>
<b>Arsênio</b>	0,005	0,05
<b>Selênio</b>	<b>0,049</b>	<b>0,01</b>
<b>Titânio</b>	1,00	
<b>Cianeto</b>	0,02	0,1

Analisando-se os resultados do teste de Solubilização verifica-se que 7 dos compostos encontrados no ensaio apresentaram concentrações superiores aos valores determinados por norma, quais sejam, S – SO<sub>4</sub>, Alumínio, Fluoreto, Cádmio, Chumbo, Dureza CaCO<sub>3</sub> e Selênio. Outros 3 compostos apresentaram valores iguais ou próximos do admitido, quais sejam, Cromo, Bário e Fenol. A presença de compostos químicos perigosos pode ter explicação no tipo de coleta de esgoto realizada, que foi mista, a qual pode trazer consigo este tipo de materiais. A suas presenças podem trazer danos a saúde e ao meio ambiente, principalmente se sua disposição não for segura e estável, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 1987).

De acordo com a NBR 10004, o material somente pode ser considerado classe III, resíduo inerte, se nenhum de seus constituintes apresentarem concentrações superiores aos da Listagem 8. Com base neste resultado, a cinza de Lodo Sanitário analisada deve ser classificada como resíduo não inerte.

Conforme COLLINS (1977), o Serviço Público de Saúde Americano limita a presença de S- SO<sub>4</sub> para disposição de resíduos em aterros em 250 mg/l. Este limite é ultrapassado pela Cinza de Lodo Sanitário aqui analisada.

### **5.8.2 Lixiviação da Cinza de Lodo Sanitário**

Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos (ABNT, 1987).

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 1987), quando o extrato obtido na amostra lixiviada contiver qualquer um dos contaminantes em concentrações superiores aos valores constantes na Listagem 7, do Anexo G, desta norma, a qual apresenta os limites máximos de cada composto, a amostra passa a ser considerada como Tóxica.

Toda a amostra classificada pela NBR 10004 como Tóxica é considerada como resíduo Classe I, perigoso. Porém existem, conforme a norma, outros fatores como a patogenicidade, independentes desta, que também podem levar um resíduo a ser classificado como perigoso.

Na TABELA 5.8, apresentam-se os resultados do ensaio realizado de Lixiviação de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 1987) e os padrões da NBR 10004 (ABNT, 1987) para este ensaio.

TABELA 5.8 Resultados do Teste de Lixiviação (NBR 10005) e os padrões máximos da NBR 10004

<b>Determinações</b>	<b>Cinza de Lodo (mg/l)</b>	<b>Padrões para o teste de Lixiviado NBR 10004 (mg/l)</b>
<b>Fluoreto</b>	0,81	150,0
<b>Cádmio</b>	0,01	0,5
<b>Chumbo</b>	0,05	5,0
<b>Cromo</b>	0,02	5,0
<b>Bário</b>	1,00	100,0
<b>Prata</b>	0,01	5,0
<b>Mercúrio</b>	0,0005	0,1
<b>Arsênio</b>	0,024	5,0
<b>Selênio</b>	0,062	1,0

Nos resultados apresentados na TABELA 5.8, as concentrações de todos os compostos lixiviados apresentaram-se abaixo dos valores estabelecidos por norma.

Pode-se afirmar então que, com base neste ensaio, o material não pode ser classificado como tóxico e portanto perigoso.

## 5.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A CARACTERIZAÇÃO

A caracterização da cinza de Lodo possibilitou um maior conhecimento sobre a classificação do resíduo e quanto a potencialidade de seu aproveitamento como adição ao concreto.

Quanto a classificação do resíduo pode-se constatar:

- A análise química do material indica a presença de compostos patogênicos, em concentrações acima da estabelecida na NBR 10004 (ABNT, 1987), no seu Anexo I, Listagem 9 – Concentrações máximas de poluentes na massa bruta do resíduo, que são



utilizadas pelo Ministério do Meio Ambiente Francês e aceitas por esta norma, para classificação destes como patogênicos e perigosos, no caso cromo e chumbo;

- Na análise química, de Lixiviação e de Solubilização das Cinzas de Lodo foram encontrados diversos compostos que, de acordo com a Listagem 4 da NBR 10004, são substâncias que conferem periculosidade aos resíduos sólidos, entre eles pode-se citar: arsênio, bário, cianeto, cádmio, chumbo, cromo, fenol, mercúrio, selênio e prata;

- No teste de Solubilização pode-se identificar que o material não pode ser classificado como inerte;

- No Teste de Lixiviação constatou-se que o material não apresenta características de tóxico;

A presença de compostos perigosos detectados na análise química poderia ser indício que o material fosse classe I ( Resíduo Perigoso), porém nos testes de Solubilização e Lixiviação esta hipótese não foi plenamente comprovada. Desta forma, pode-se classificar a amostra deste resíduo de Classe II, Resíduo Não Inerte e observar que na sua composição existem compostos que podem levar à periculosidade do material.

Quanto a possibilidade de aproveitamento da cinza de Lodo como adição ao concreto a caracterização trouxe as seguintes informações:

- A composição química do resíduo apresenta-se muito semelhante à de outros materiais utilizados como adições minerais em cimentos e concretos;

- Embora na difração de Raio X tenha se verificado que a amostra apresenta uma grande quantidade de compostos cristalinos, o que foi possível concluir devido à alta quantidade de picos identificada destes compostos, não pode ser descartada a possibilidade da presença, em menor quantidade, de compostos amorfos ;

- A difração de Raios X confirmou a predominância da sílica na amostra, na forma de quartzo, além de outros compostos cristalinos em menor quantidade.

- As três granulometrias analisadas mostraram que o material é bastante fino. No seu estado incinerado e destorroado apresenta superfície específica de 253,4 m<sup>2</sup>/kg, no peneirado na #200 apresenta superfície de 831,0 m<sup>2</sup>/kg e no moído de 1363 m<sup>2</sup>/kg. As granulometrias apresentadas pelas cinzas encontram-se dentro das faixas de materiais finos utilizados na confecção de concreto;

- Na microscopia eletrônica de varredura pode-se observar o formato das partículas e a disposição destas, constatando-se que os grãos maiores são os de quartzo e sobre estes estão depositados, em forma de finos aglomerados, os outros compostos químicos. Os grãos de quartzo tem forma predominantemente angular com algum arredondamento nas suas bordas;

- Com o ensaio de pozolanicidade pode-se verificar que, independentemente das granulometrias de cinzas analisadas, suas pozolanicidades foram praticamente iguais e próximas ao valor mínimo exigido pelas Normas para Materiais Pozolânicos. Estes resultados vieram a confirmar que, embora baixa, existe alguma atividade pozolânica no material, o que pode estar associado à grande presença de sílica, que em pequenas quantidades podem encontrar-se na forma amorfa. O  $\text{SiO}_2$  presente nas partículas menores, depositados sobre as partículas maiores, pode estar sob a forma amorfa e então ter grande influência na atividade pozolânica detectada. Este fato é reforçado, pois quando as cinzas foram moídas, estas partículas, por serem muito finas, não tiveram suas dimensões alteradas, o que resultou em pozolanicidades praticamente iguais para as três cinzas analisadas, conforme TABELA 5.5;

A classificação do material implica que este seja depositado de forma segura e definitiva. Analisando-se sobre a ótica de aproveitamento do resíduo na construção civil, as características químicas, físicas e morfológicas da cinza indicam que o seu uso no concreto pode ser uma proposta tecnicamente viável, na forma de adição.

Além disto ,experiências anteriores ( MARAGNO, POVINELLI, 1992), mostram que matrizes de cimento podem estabilizar e solidificar os compostos nocivos dos resíduos, através do encapsulamento principalmente destes compostos.

## **6 PROGRAMA EXPERIMENTAL: ADIÇÃO DE CINZA DE LODO SANITÁRIO AO CONCRETO**

A partir da caracterização da cinza de Lodo Sanitário da ETE IAPI, estabeleceu-se um programa experimental para avaliar o seu potencial como adição ao concreto.

Analizou-se diversos percentuais de adições, substituindo-se em massa 5%, 10%, 15% e 20% do cimento em concretos com diferentes relações água/ aglomerante ( $a/(c+ad)$ ) (0,50; 0,65; 0,80; 0,95 e 1,10).

Definiu-se neste trabalho a expressão água/ aglomerante ( $a/(c+ad)$ ) como sendo a relação em massa entre a quantidade de água e os materiais utilizados como aglomerantes, no caso o Cimento (c) e a Cinza de Lodo Sanitário (ad).

Os parâmetros utilizados para a avaliação foram obtidos através de ensaios em concretos frescos e endurecidos.

Nos concretos frescos buscou-se avaliar o efeito das adições na trabalhabilidade, utilizando-se para tanto o ensaio de Abatimento de Tronco Cone – NBR 7223 (ABNT, 1992). Nos concretos endurecidos buscou-se avaliar a influência das adições de cinza nas propriedades mecânicas dos concretos, através dos ensaios de Resistência à compressão Simples – NBR 5739 (ABNT, 1980) e Determinação do Módulo de Deformação Estática – NBR 8522 (ABNT, 1983) e a influência na durabilidade dos concretos, através dos ensaios de Absorção de água com imersão – NBR 9778 (ABNT, 1987), Determinação da absorção de água por Capilaridade - NBR 9779 (ABNT, 1995) e Profundidade de Carbonatação de acordo com o RILEM CPC – 18 (1988). Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (LMC/EEC/UFG).

Em uma etapa final dos experimentos foi analisada a capacidade do concreto em reter de forma segura os compostos poluentes das cinzas, o que foi avaliado através do ensaio de Solubilização de Resíduos de acordo com as NBR 10006 – Solubilização de Resíduos (ABNT, 1987). Este ensaio foi realizado no Laboratório de Análises Químicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Os ensaios de caracterização do cimento utilizado foram realizados no Centro Tecnológico de Engenharia Civil das Centrais Elétricas de Furnas S/A .

Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (LMC/EEC/UFG).

Os ensaios de caracterização das cinza de Lodo Sanitário foram realizados, conforme descrição no Capítulo 5 desta Tese, no Centro Tecnológico de Engenharia Civil das Centrais Elétricas de Furnas S/A e no Laboratório de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

As análises dos resultados dos experimentos foram realizadas com tratamento estatístico, utilizando-se o programa “ Statgraphics” .

## 6.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Descreve-se neste item as variáveis utilizadas e procedimentos utilizados nesta fase da pesquisa.

Para dar validade aos resultados do programa experimental, a programação da pesquisa teve por base técnicas estatísticas (NANNI e RIBEIRO, 1987 e MONTGOMERY, 1986) já utilizadas em outras pesquisas na área de concreto (DAL MOLIN, 1995; CAÑAS MARTINS, 1997; MOURA, 2000; GAVILÁN, 2000 e GEYER, 2001).

### 6.1.1 Variáveis independentes

- a) **Relação água / (cimento + cinza de Lodo) ou  $a/ (c+ad)$** : 0,50; 0,65; 0,80; 0,95 e 1,10. Estes valores foram adotados levando-se em conta que, no presente trabalho, busca-se avaliar o desempenho de concretos comumente utilizados nas obras brasileiras, de média e baixa resistência. Estudos preliminares anteriormente realizados demonstraram que a utilização de adições de cinzas de Lodo em concretos com baixa relação  $a/ (c+ad)$

(  $< 0,50$ ) não apresentavam desempenhos satisfatórios (GEYER, DAL MOLIN e CONSOLI, 1997). Para tornar a distribuição mais representativa, foi estabelecida uma sucessão ordenada de relações  $a / (c+ad)$ , partindo-se de 0,50 com uma progressão aritmética de razão 0,15, chegando-se até  $a / (c+ad) = 1,10$ .

- b) **Adição de Cinza de Lodo (ad)**: substituição de 5%, 10%, 15% e 20% sobre a massa do cimento. A grande maioria dos pesquisadores (conforme Capítulo 4) apresentam como teores de adição de cinzas de Lodo possíveis de serem utilizados no concreto entre 5% e 20%. Estudos realizados por TAY (1987) e por GEYER, DAL MOLIN e CONSOLI (1997) mostraram que adições superiores a 20% reduzem muito a resistência à compressão do concreto, inviabilizando sua aplicação.
- c) **Idade**: As idades para a realização dos ensaios foram estabelecidas em função das condições materiais e de tempo disponíveis, procurando-se adotar idades comumente utilizadas em análise de comportamento do concreto. Para cada ensaio realizado ocorreram variantes nas idades, sendo estabelecidas as seguintes: Resistência à compressão simples, 28 e 91 dias; Módulo de deformação, 28 dias; Profundidade de carbonatação, 91, 210 e 540 dias; Absorção por imersão, 91 dias; Absorção por capilaridade, 180 dias e ensaios de Solubilização no concreto, aos 91 dias.
- d) **Cura**: foram utilizadas duas situações de cura: câmara úmida e ambiente e câmara úmida e ambiente com temperatura e umidade controladas em  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $50\% \pm 10\%$ , respectivamente. O primeiro caso foi aplicado aos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, carbonatação e solubilização e o segundo aos ensaios de absorção de água.

### 6.1.2 Variáveis dependentes

#### a) **Consistência**

A consistência dos concretos depende de vários fatores tais como a relação água/cimento ( $a/c$ ), a relação pasta/inertes, o tipo de inertes (dimensão, granulometria, forma, teor de finos, porosidade, entre outros), a natureza do ligante e a presença de

aditivos na mistura (MEHTA e MONTEIRO, 1994; TATTERSALL, 1978, CANOVAS, 1996).

Nos traços convencionais, isto é, aqueles sem adições, os concretos foram dosados para uma consistência de 8,0cm. Esta especificação de consistência foi adotada por ser freqüentemente utilizada nas obras correntes. Além disto, para obras convencionais, conforme RUSSEL et al. citado por ALMEIDA (1990), deve-se evitar concretos com consistência superior a 10,0 cm, o que pode proporcionar maior fissuração plástica, principalmente em peças densamente armadas.

O objetivo deste ensaio foi verificar a influência das adições na consistência dos concretos e foi realizado segundo a norma de Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco Cone – NBR 7223 (ABNT, 1992).

#### **b) Resistência à compressão simples**

A resistência à compressão dos concretos é ditada por um série de fatores. Os principais, segundo NEVILLE (1997); MEHTA e MONTEIRO (1994); GONÇALVES (1987), entre outros, são: natureza e dosagem do ligante, granulometria, máxima dimensão, forma, textura superficial, resistência e rigidez dos agregados; relação água/cimento; porosidade; relação cimento/inertes, idade; grau de compactação; condições de cura e condições do ensaio.

Nestes experimentos trabalhou-se com as variáveis relação  $a/(c+ad)$  e teor de adições de Cinza de Lodo Sanitário (ad) e idade do concreto. Os ensaios foram realizados segundo a norma NBR 5739 – Concreto : ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 1980).

#### **c) Módulo de Elasticidade**

O módulo de elasticidade do concreto é afetado, a princípio, pelos mesmos fatores já citados na análise da resistência à compressão. Porém a porosidade e o tipo dos agregados graúdos tem maior influência sobre esta característica (MEHTA e MONTEIRO, 1994; ALMEIDA, 1990).

Existem indicações de que quanto maior o volume, dimensão máxima e módulo de elasticidade do agregado gráúdo maior o módulo do concreto. A relação água/cimento e a porosidade atuam inversamente ao crescimento do módulo. Outros fatores que também influenciam são a aderência pasta/ agregado e a própria resistência do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994; MINDESS, 1983; COUTINHO, 1988;PARROT 1973).

Os ensaios foram realizados em CP cilíndricos de 15cm de diâmetro por 30 cm de altura, conforme NBR 8522 (ABNT,1983 ). Esta norma considera que a tensão inicial adotada na curva seja a correspondente a 0,5 MPa, a tensão considerada para o cálculo dos diferentes módulos de 30% da resistência à compressão do concreto. A ASTM C- 469 considera a tensão para cálculo dos diferentes módulos a de 40% da resistência à compressão do concreto. Neste trabalho foi adotada a recomendação da ASTM C – 469, considerando que na revisão da NB 1 – Norma Brasileira de Concreto (ABNT, 1997) está sendo recomendado o procedimento prescrito na ASTM .

Optouu-se pelo cálculo do módulo de elasticidade secante, que é conhecido através da declividade de uma reta traçada na origem, a um ponto da curva correspondente a uma tensão relativa da carga de ruptura.

#### **d) Profundidade de Carbonatação**

Segundo ANDRADE (1992), o dióxido de carbono  $CO_2$  presente no ar pode penetrar através da rede de poros do concreto e reage com os constituintes alcalinos da pasta de cimento, principalmente com o hidróxido de cálcio. Esse processo leva à formação de carbonatos cálcicos alcalinos e a uma redução do valor do pH da solução aquosa presente nos interstícios do concreto.

O fenômeno da carbonatação está ligado diretamente com a durabilidade do concreto, especialmente quanto se trata de concreto armado, pois a redução do pH deste material, advinda da carbonatação, despassiva as armaduras, fazendo com que o aço passe a estar despassivado, isto é , vulnerável a que se instale o processo de corrosão (VÉNUAT e ALEXANDRE, 1969; HO e LEWIS, 1987; MEHTA e MONTEIRO, 1994; entre outros).

Também a carbonatação é uma forma indireta de se verificar a capacidade do

concreto em deixar penetrar gases no seu interior, os quais podem ser agentes agressivos ao material.

No caso do concreto simples, a carbonatação pode influir positivamente na qualidade do material como nas resistências mecânicas, na permeabilidade e na resistências do concreto aos ataques químicos e físicos. Pode influenciar negativamente quanto à contração e a fluência dos concreto (NEVILLE, 1997; ACI COMMITTEE 201, 1988; BIER, 1986 e RILEM, 1988).

A espessura da capa carbonatada ou lixiviada denomina-se “profundidade de carbonatação”, identificada a partir da redução do pH, a qual pode ser visualizada devido à troca de cor de um indicador químico apropriado, sendo o mais utilizado uma solução a base de fenolftaleína.

A medida de profundidade de carbonatação dos corpos-de-prova foi realizada nas idades de 91, 210 e 540 dias. Os corpos-de-prova foram mantidos em condição de laboratório, na cidade de Goiânia, Goiás, onde a temperatura no período variou entre 21 e 24° C e a umidade relativa do ar entre 45 e 75%. O procedimento de execução deste ensaio seguiu as recomendações do RILEM CPC-18 (1988) e consiste em borrifar solução de fenolftaleína, a 1% dissolvida em 70% de álcool etílico e 29% de água, na superfície do concreto previamente quebrado para este fim. Foi feita então a medição da profundidade de carbonatação a partir da superfície do concreto, em três pontos diferentes, tomando-se como valor desta, a média dos valores medidos. Adotou-se a indicação incolor como sendo a superfície carbonatada e a violeta como não carbonatada.

#### **e) Absorção de água**

O ensaio de absorção de água é citado por pesquisadores japoneses (TANABE, 1988) como apropriado para avaliação comparativa entre diferentes concretos submetidos a diferentes dosagens, porém em algumas experiências realizadas pelo autor ocorreu grande variabilidade nos resultados.



Neste trabalho utiliza-se dois métodos de ensaios de absorção de água pelo concreto: o da NBR 9778 (ABNT, 1987) Ensaio de absorção com imersão e o da NBR 9779 - Determinação da absorção de água por capilaridade (ABNT, 1995).

NEVILLE (1997) questiona a validade dos ensaios de absorção de água para a determinação quantitativa da qualidade do concreto, porém concorda que é inquestionável que concretos com baixa absorção são normalmente de boa qualidade.

No caso dos ensaios de absorção, os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida até os 28 dias e após colocados em uma sala com umidade relativa do ar de 50 +- 10 % e temperatura de 25 +- 5°C , controladas, até o final dos ensaios.

Nesta Tese utiliza-se os ensaios de absorção, não para verificar diretamente a qualidade dos concretos, mas sim para verificar se existem diferenças entre concretos com diferentes teores de adições e relações  $a/(c+ad)$ , e com isto analisa-se, indiretamente, a durabilidade do material.

#### **f) Solubilização do concreto executado com adição de Cinza de Lodo**

Conforme CLÁUDIO (1987), KORCHI ( 1986), OLIVEIRA e BUCHLER (1993) e PAVAN (1985), a estabilização com o auxílio de argamassas e concretos a base de cimento Portland tem sido um dos métodos mais eficazes e viáveis para resíduos com concentrações de metais pesados e outros poluentes perigosos não orgânicos.

WATANABE e NOZAKI (1996) apresentaram também estudos comprovando que através do concreto com cimento Portland consegue-se enclausurar resíduos que possuam em suas composições metais pesados e substâncias perigosas.

Para este ensaio adotou-se o concreto com relação  $a/(c+ad)=1,10$  com teores de adições de 0%, 10% e 20% .

As razões para a escolha de concretos com esta  $a/(c+ad)$  (1,10) foram duas: primeiro buscou-se verificar se nos concretos com menor consumo de cimento e maior porosidade ocorreria a estabilização do resíduo, e segundo porque estes concretos foram os que

apresentaram melhor desempenho mecânico com as adições de Cinza, apresentando com isto grande potencial de serem utilizados na prática.

Realizou-se o ensaio de Solubilização de Resíduos em amostras de concreto confeccionado com adição de cinzas e no cimento utilizado na pesquisa, através do processo estabelecido na NBR 10006 - Solubilização (ABNT, 1987), com o objetivo de verificar se o concreto possui capacidade de estabilizar e fixar os compostos poluentes da Cinza do Lodo Sanitário.

## **6.2 PLANEJAMENTO DA AMOSTRA**

De acordo com DAL MOLIN (1995), quando se planeja experimentos com materiais de construção, os mesmos quase sempre envolvem muitos fatores, onde é necessário estudar o efeito interligado destes fatores ou variáveis envolvidas. Na medida em que o número de fatores ou variáveis aumenta, o número de combinações de tratamentos cresce muito rapidamente.

No caso deste trabalho experimental, se fossem moldados para cada idade de ensaio, em concreto endurecido, 3 corpos-de-prova, necessitaríamos de um número total de 675 corpos-de-prova.

Desta forma, conforme indica DAL MOLIN (1995), é necessário limitar as variáveis, por questões econômicas, ou por questões de tempo e trabalho envolvidos.

O fracionamento de projetos surge como uma alternativa onde estas dificuldades impedem de realizar-se o experimento completo, e assim apenas uma fração das combinações é ensaiada ( MONGOMERY, 1986; NANI e RIBEIRO, 1987).

DAL MOLIN (1995), tendo realizado experimentos em concreto utilizando amostra integral, verificou se as técnicas estatísticas de fracionamento de projeto poderiam ser utilizadas sem prejuízo das conclusões e modelagem do comportamento de concretos ensaiados e concluiu que é possível, com um planejamento fracionado de ensaios, selecionar os experimentos de tal forma que se consiga, com confiabilidade, analisar

estatisticamente os dados e traçar curvas de regressão sem a necessidade de realizar todos os experimentos da matriz gerada, a partir das variáveis independentes a estudar.

A fim de permitir uma análise mais ampla dos efeitos de diferentes teores de adições de Cinza de Lodo Sanitário em concretos com várias relações  $a/(c+ad)$ , aplicou-se neste trabalho um fracionamento estatístico tipo cubo/estrela, o que permitiu, com uma reduzida amostra, uma grande amplitude de resultados.

De acordo com NANNI e RIBEIRO (1987) e MONTGOMERY (1976), existem várias técnicas para proceder-se ao fracionamento. DAL MOLIN (1995) afirma que projetos fatoriais fracionados são práticos, porém o teste é forte somente para os efeitos principais e interações de primeira ordem, não detectando-se possíveis mudanças de concavidade no desenvolvimento de regressões. Uma técnica mais poderosa, segundo o autor, reside nos projetos de superfície de resposta, que para ajustar um modelo de segunda ordem deve ter, no mínimo, três níveis de cada fator. O projeto mais usado para ajustar um modelo de segunda ordem consiste de um fatorial fracionado somado a pontos axiais e pontos centrais. Estes pontos, distribuídos no espaço amostral devidamente balanceados, permitem avaliar os efeitos produzidos pela mudança de nível dos fatores analisados. Os pontos centrais, que formam uma espécie de estrela, possibilitam a identificação de interações entre os mesmos. MONTGOMERY (1976) apresenta uma descrição detalhada desta metodologia, a qual foi aplicada a esta pesquisa.

O fracionamento aplicado consta na Tabela 6.1, onde são apresentados os diferentes concretos estudados, expressos por diferentes teores de adições de Cinza de Lodo Sanitário e diversas relações  $a/(c+ad)$ . Na TABELA 6.2 apresentam-se as variáveis consideradas e a codificação realizada para as análises estatísticas.

TABELA 6.1 Fracionamento para os ensaios

a/(c+ad)	Cinza de Lodo (%)				
	0%	5%	10%	15%	20%
0,50	X		X		X
0,65		X		X	
0,80	X		X		X
0,95		X		X	
1,10	X		X		X

Esta matriz permite relacionar variáveis dependentes e independentes, originando a através de um tratamento estatístico um equação de regressão. A análise de variância desta variáveis permitem avaliar sua importância, identificando quais delas são significativas, ou seja quais tem maior impacto sobre a variável de resposta. A regressão representará o modelo estudado e suas análises de variância validará ou não o modelo matemático originado no tratamento estatístico.

TABELA 6.2 Codificação realizada para as variáveis utilizadas nas análises estatísticas.

<b>Teor de Adição (%)</b>	<b>Código recebido</b>
0	-1
5	-0,5
10	0
15	0,5
20	1
<b>Relação água/aglomerante (a/(c+ad))</b>	<b>Código recebido</b>
0,50	1
0,65	-0,5
0,80	0
0,95	0,5
1,10	1
<b>Idade (dias)</b>	<b>Código recebido p/ o ensaio de Resistência à compressão</b>
28	-1
91	1
<b>Idade (dias)</b>	<b>Código recebido p/ o Ensaio de Carbonatação</b>
91	1
210	-0,47
540	1

Para todos os ensaios realizados em concretos endurecidos trabalhou-se com amostras cilíndricas, confeccionadas nos padrões de ensaio da ABNT, nas dimensões de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura. As amostras foram preparadas de acordo com a NBR12821- Preparação de concreto em Laboratório (ABNT, 1993).

A Tabela 6.3 mostra os ensaios realizados e o número de corpos-de prova preparados para cada um deles, os quais para as análises em concretos endurecidos totalizam 162 unidades.

TABELA 6.3 Amostra utilizada para os ensaios

Ensaio	Abatimen to de Tronco Cone	Compressão simples		Módulo de elasticidade	Profundidade de Carbonatação			Absorção de água		Solubilização
Idade do Ensaio(dias)	0	28	91	28	91	210	540	91	180	28
Nºde CP por traço	2	2	2	2	2	2	2	2	2	02
Número total de CP	26	26	26	26	26 (*)	26 (*)	26 (*)	26	26	06

(\*) Para o ensaio de profundidade de carbonatação os mesmos corpos-de prova foram utilizados nas três idades.

## 6.3 MATERIAIS UTILIZADOS

### 6.3.1 Cimento

O cimento utilizado na confecção dos concretos foi o CP V – Cimento ARI. Este material foi escolhido por ser o disponível no mercado produzido sem adições pozolânicas, visto que no Brasil não é normalmente encontrado o Cimento Portland Comum (CPI). O Cimento ARI utilizado foi especialmente produzido para esta pesquisa, sem nenhuma adição mineral ou material inerte (fíler).

As características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado foram analisadas no Laboratório do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de FURNAS S/A e são apresentadas na Tabela 6.4.

Pode-se observar na Tabela 6.4 que os valores obtidos nos ensaios de caracterização atenderam os requisitos exigidos pela norma NBR 5733 – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ABNT, 1991). Verificou-se também que os valores de resistência à compressão do cimento foram bastante superiores ao exigido por norma.

TABELA 6.4 Caracterização química, física e mecânica do cimento ARI utilizado na Tese.

CARACTERÍSTICAS	DETERMINAÇÕES	MÉTODO DE ENSAIO	VALORES OBTIDOS	EXIGÊNCIAS DE NORMA (NBR 5733)
<b>QUÍMICAS</b>	PERDA AO FOGO	NBR 5743		≤ 4,0 %
	RESÍDUO INSOLÚVEL	NBR 5744		≤ 1,0 %
	ÓXIDOS DE SILÍCIO (SiO <sub>2</sub> )	NBR 5749	19,85 %	
	ÓXIDOS DE ALUMÍNIO (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	NBR 5749	5,24 %	
	ÓXIDOS DE FERRO (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	NBR 5749	3,98 %	
	ÓXIDOS DE CÁLCIO TOTAL (CaO)	NBR 5749	63,44 %	
	ÓXIDOS DE MAGNÉSIO (MgO)	NBR 5749	1,74 %	
	ÓXIDOS DE ENXOFRE (SO <sub>3</sub> )	NBR 5745	3,13 %	≤ 6,5 %
	ÓXIDOS DE SÓDIO (Na <sub>2</sub> O)	NBR 5747	0,27 %	≤ 3,5 %
	ÓXIDOS DE POTÁSSIO (K <sub>2</sub> O)	NBR 5747	0,02%	
	I = CaO/SiO <sub>2</sub>		3,20	
<b>FÍSICAS</b>	MASSA ESPECÍFICA ABSOLUTA	NBR NM 23	3180 kg/m	
	FINURA - % # 200	NBR 7215	0,1	≤ 6,0
	FINURA - % # 325	NBR 7215	1,5	
	FINURA – SUPERFÍCIE ESPECÍFICA	NBR NM 76	471 m <sup>2</sup> /kg	> 300 m <sup>2</sup> /kg
	EXPANSIBILIDADE A FRIO	NBR 7115		< 5 mm
	TEMPO DE PEGA INICIAL	NBR 11581	170 min.	> 1 h
	TEMPO DE PEGA FINAL	NBR 11581	200 min.	
<b>MECÂNICAS</b>	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	NBR 7215		
	1DIA		23,9 MPa	> 11 MPa
	3DIAS		35,0 MPa	> 22 MPa
	7DIAS		41,5 MPa	> 31 MPa
	28DIAS		50,0 MPa	

### 6.3.2 Agregados

Os ensaios de caracterização dos agregados utilizados nesta pesquisa foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

### a) Areia

Como agregado miúdo foi utilizada a areia natural da cidade de Goiás, a qual, de acordo com a norma NBR 9776 (ABNT, 1987), apresenta uma massa específica absoluta de  $2,60 \text{ kg/dm}^3$  e de acordo com a NBR 7251 (1982) apresenta uma massa unitária  $1,53 \text{ kg/dm}^3$ . A composição granulométrica do agregado miúdo e seu Módulo de Finura (MF) foram realizados conforme a norma NBR 7217 (ABNT, 1987) e são apresentados na Tabela 6.5

TABELA 6.5 – Composição granulométrica do agregado miúdo.

Abertura das peneiras (mm)	Massa retido (g)	Fração retida na peneira (%)	Fração retida acumulada (%)
9,5	12	1,2	1,2
4,8	26	2,6	3,8
2,4	58	5,8	9,6
1,2	107	10,7	20,3
0,6	312	31,2	51,5
0,3	337	33,7	85,2
0,15	120	12,0	97,2
Prato	28	2,8	
Totais	1000	100,00	
MF (Módulo de Finura) = 2,68		Diâmetro máximo = 4,8 mm	

### b) Agregado graúdo

Na confecção dos concretos foi utilizado como agregado graúdo a brita proveniente da Região Sul da cidade de Goiânia, denominada de Brita Micaxisto, com dimensão máxima característica de 25 mm. O massa específica do material, ensaiado de acordo com a NBR 9937 (1987), é de  $2,78 \text{ kg/dm}^3$  e a massa específica unitária, de acordo com a NBR 7251 (1987) é de  $1,38 \text{ kg/dm}^3$ . A composição granulométrica da brita e seu Módulo de Finura (MF), foram determinados de acordo norma NBR 7217 (ABNT, 1987) e constam na Tabela 6.6.



TABELA 6.6 Composição granulométrica do agregado graúdo.

Abertura das peneiras (mm)	Massa retido (g)	Fração retida na peneira (%)	Fração retida acumulada (%)
152			
127			
102			
76			
50			
38			
25			
19	1362	13	13
12,7	7201	72	85
9,5	1298	12	98
4,8	106	1	99
2,4	33	0	100
Prato			400
Totais	10000	100	
M.F. = 7,10 Diâmetro max. 25 mm			

### 6.3.3 Cinza de Lodo

As amostras de cinzas de Lodo foram obtidas na ETE IAPI, e submetidas à calcinação à temperatura de 800°C nos incineradores da INFRAERO, conforme metodologia descrita no item 5.2, do Capítulo 5.

Adotou-se como material de substituição do cimento a cinza destorroada, cujas características de granulometria constam no item 5.3.1 do Capítulo 5. A opção por esta cinza foi feita ao verificar-se, através dos ensaios realizados da caracterização do material, apresentados no Capítulo 5, que, as cinzas submetidas à redução de tamanho, seja por peneiramento ou por moagem, não apresentaram significativo melhor desempenho quanto à pozolanicidade, tornando-se as operações de moagem ou peneiramento, que possuem custos elevados, ineficazes na melhoria desta propriedade do material.

Devido à quantidade de material necessária ao programa experimental proposto, aproximadamente 80 kg de cinzas, optou-se por um destorroamento no moinho de bolas,

dividindo-se a amostra em 4 lotes de 20 kg, com período de destorroamento no moinho, para cada lote, de 30 minutos à 33 RPM.

#### **6.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO**

A Tabela 6.7 apresenta o proporcionamento dos materiais utilizados na confecção dos concretos. O método de dosagem utilizado foi o proposto por ALVES (1999), que é uma adaptação do método do ACI (American Concrete Institute). O abatimento para os concretos sem adição foi fixado em  $8\text{cm} \pm 2$  e o teor de argamassa em 48%.

A mistura dos materiais foi realizada em betoneira de eixo inclinado por um período de 2 minutos. A ordem de colocação dos materiais foi mantida constante para todas as misturas: brita, parte da água (50%), cimento misturado com a adição (Cinza de Lodo), areia e o restante da água.

O processo de adensamento adotado foi mecânico, segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 1980). Após a moldagem, os corpos-de-prova foram mantidos em câmara úmida ( $UR = 95\%$ ) e temperatura de  $23 \pm 2^\circ \text{C}$  (NBR 5738- ABNT, 1984) até a data de ruptura (ensaios mecânicos).

Na datas previstas para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, os corpos-de-prova foram retirados da câmara úmida, 2 horas antes do rompimento, e capeados com enxofre.

Na TABELA 6.7 são apresentadas as especificações da dosagens, considerando as relações  $a/(c+ad)$  e os teores de adição utilizados. Em negrito na TABELA 6.7 constam os traços que foram moldados, de acordo com o fracionamento proposto na TABELA 6.1. Para fins do cálculo do consumo de cimento e cinza adotou-se 2% de ar incorporado.

TABELA 6.7 Especificações do concretos utilizados

<b>Traço</b>	<b>Teor de adição (%)</b>	<b>Traço em massa Cimento: areia: brita</b>	<b>Água/materiais cimentantes (a/(c+ad))</b>	<b>Consumo de aglomerante /(kg/m3)</b>	<b>Consumo de cimento (kg/m3)</b>	<b>Consumo de Cinza de Lodo (kg/m3)</b>
<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1 : 1,52 : 2,24</b>	<b>0,50</b>	<b>444,0</b>	<b>444,0</b>	<b>0</b>
	5			443,8	421,6	22,2
	<b>10</b>			<b>443,2</b>	<b>398,9</b>	<b>50,3</b>
	15			442,5	376,1	66,4
	<b>20</b>			<b>441,9</b>	<b>353,5</b>	<b>88,4</b>
<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1: 2,05 : 3,02</b>	<b>0,65</b>	345,1	345,1	0
	<b>5</b>			<b>344,8</b>	<b>327,5</b>	<b>17,2</b>
	10			344,5	310,0	34,5
	<b>15</b>			<b>344,1</b>	<b>292,4</b>	<b>51,7</b>
	20			343,7	274,9	68,8
<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1: 2,69 : 3,97</b>	<b>0,80</b>	<b>274,0</b>	<b>274,0</b>	<b>0</b>
	5			273,7	260	13,7
	<b>10</b>			<b>273,5</b>	<b>246,1</b>	<b>27,4</b>
	15			273,3	232,3	41,0
	<b>20</b>			<b>273,0</b>	<b>218,4</b>	<b>54,6</b>
<b>4</b>	<b>0</b>	<b>1: 3,25 : 4,80</b>	<b>0,95</b>	231	231	0
	<b>5</b>			<b>230,9</b>	<b>219,3</b>	<b>11,6</b>
	10			230,7	207,6	23,1
	<b>15</b>			<b>230,5</b>	<b>195,9</b>	<b>34,6</b>
	20			230,4	184,4	46,0
<b>5</b>	<b>0</b>	<b>1: 3,82 : 5,65</b>	<b>1,10</b>	<b>199,3</b>	<b>199,3</b>	<b>0</b>
	5			199,2	189,2	10
	<b>10</b>			<b>199,0</b>	<b>179,1</b>	<b>19,9</b>
	15			198,9	169,0	29,9
	<b>20</b>			<b>198,8</b>	<b>159,0</b>	<b>39,8</b>

## 6.5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCRETO FRESCO

### 6.5.1 Abatimento de Tronco Cone (Slump Test)

#### 6.5.1.1 Resultados

A TABELA 6.8 apresenta os resultados medidos no ensaio de Abatimento de Tronco Cone ( Slump test) nos concreto executados com  $a/(c+ad)$  de 0,50; 0,65; 0,80; 0,95 e 1,10, de acordo com o fracionamento proposto .

TABELA 6.8 Ensaio de Abatimento de Tronco Cone (slump test) realizado conforme a NBR 7223 (ABNT,1992).

a/(c+ad)	Cinza de Lodo Sanitário (%)				
	0	5	10	15	20
<b>0,50</b>	8,0cm		8,0cm		9,0cm
<b>0,65</b>		9,0cm		12,0cm	
<b>0,80</b>	8,5cm		8,5cm		8,5cm
<b>0,95</b>		11,0cm		12,0cm	
<b>1,10</b>	7,50cm		9,0cm		11,0cm

#### 6.5.1.2. Análise dos resultados do Abatimento de Tronco Cone

Durante a realização das misturas, em todos os traços utilizados, verificou-se que cada concreto apresentava características diferentes à medida em que era alterado o teor de Cinzas.

Observou-se nos resultados, que a substituição de parte do cimento na mistura por Cinza de Lodo Sanitário, na maioria dos casos estudados, promoveu um aumento na

consistência, o que poderia indicar, indiretamente, um aumento da trabalhabilidade dos concretos. A fim de confirmar esta tendência procedeu-se a uma análise estatística destes resultados, porém não foi possível obter-se um modelamento estatístico significativo. Desta forma não se pode afirmar que a tendência observada é significativa para os concretos executados.

De acordo GONÇALVES (2000), a incorporação de adições sem atividade pozolânica nos concretos confere às propriedades do concreto, no seu estado fresco, várias influências, como : aumento da coesão, diminuição da segregação, minimização da exsudação, podendo ou não aumentar o consumo de água. As influências destes materiais nas propriedades do concreto fresco estão diretamente ligadas a sua finura, forma e massa específica.

MEHTA e MALHOTRA (1996), citando vários autores, mostram que a substituição de parte do cimento por adições podem melhorar as condições do concreto quanto à demanda de água e quanto à trabalhabilidade.

GONÇALVES (2000), em experimento com resíduo a base de granito, de granulometria média muito pequena ( $6,74 \mu\text{m}$ ), não observou alterações na consistência e na coesão de concretos com  $a/(c+ad)$  entre 0,40 e 0,70 e com teores de adição de 10 e 20%.

No caso da cinza de Lodo, que apresenta granulometria média de  $33 \mu\text{m}$ , a qual varia desde  $3 \mu\text{m}$  a  $241 \mu\text{m}$ , pode-se afirmar que não se trata de um material muito fino e que, portanto, pode-se admitir não influenciar negativamente reduzindo a consistência do concreto.

Os resultados obtidos nos experimentos realizados por TAY (1987), apresentados na TABELA 4.5 do Capítulo 4 deste trabalho, demonstram que a substituição de parte do cimento no concreto por cinzas de Lodos Sanitários nos percentuais de 5%, 10%, 15% e 20 %, também promoveram um aumento da consistência.

Comparando-se os resultados obtidos por TAY (1987) com os aqui obtidos, nos concretos de  $a/(c+ad) = 0,50$ , pode-se verificar a mesma tendência.

Uma das possíveis justificativas para o efeito de aumento da consistência dos concretos pode estar no fato de que ao substituir-se parte do cimento por Cinzas de Lodo,

como estas possuem uma superfície específica menor que a do cimento utilizado (superfície das cinzas é de 253 m<sup>2</sup>/kg e do cimento utilizado é de 471m<sup>2</sup>/kg), apresentam uma textura lisa e são formadas na sua maioria por grãos de quartzo, existe uma tendência a reduzir-se o consumo de água. No caso, tendo sido mantida a mesma relação a/(c+ad), promoveu-se, com as substituições, um aumento na granulometria média dos finos, o que levou a uma menor demanda de água de molhagem, com conseqüente aumento da água livre na pasta, responsável pela trabalhabilidade da mistura.

Este efeito permite supor que, caso se trabalhasse com a consistência fixa em todos os concretos, poderia ser reduzida a quantidade de água naqueles concretos que apresentaram maior consistência e, com isto, obter-se melhorias quanto às propriedades mecânicas e de durabilidade do material, devido à possibilidade de uma redução na relação a/(c+ad).

## **6.6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCRETO ENDURECIDO**

Objetivando avaliar o desempenho de concretos com diferentes teores de adição de Cinza de Lodo e várias relações a/(c+ad), foram realizados os seguintes ensaios: resistência à compressão simples, módulo de elasticidade, profundidade de carbonatação, absorção de água por imersão e por capilaridade e Solubilização de Resíduos.

Considerando que o projeto do experimento foi fracionado, conforme TABELA 6.1, foi necessário definir, para cada propriedade analisada, um modelo de regressão múltipla que representasse um bom ajuste aos dados experimentais. Conforme NANNI e RIBEIRO (1992), o modelo geral de regressão múltipla é:

$$\mu_{x/y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k \quad (\text{eq. 6.1})$$

Onde  $\mu_x / y$  representa o valor esperado de  $y$  para valores das variáveis independentes  $x_1, x_2, \dots, x_k$  consideradas como não aleatórias, e  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  são os parâmetros a serem estimados.

Os modelos de regressão múltipla para os dados obtidos experimentalmente foram desenvolvidos utilizando o software statgraphics, onde também avaliou-se a significância de cada parâmetro usando os valores-  $p$  (  $p$ - value). Maiores informações sobre o modelo estatístico utilizado podem ser vistos em NANNI e RIBEIRO (1992) ou em MONTGOMERY (1986).

A regressão múltipla correlacionou a adição (ad), a relação  $a/(c+ad)$  (água/aglomerantes) e as idades em que os concretos foram ensaiados

### 6.6.1 Resistência à Compressão Simples

As TABELAS 6.9 e 6.10 apresentam os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples de acordo com o fracionamento proposto, aos 28 e 91 dias de idade respectivamente.

TABELA 6.9 Resistência à compressão simples de concretos aos 28 dias, em MPa.

<b>a/(c+ad)</b>	<b>Cinza de Lodo Sanitário (%)</b>				
	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>
<b>0,50</b>	36,90 34,5		22,9 23,2		17,2 17,1
<b>0,65</b>		23,4 24,1		19,5 19,2	
<b>0,80</b>	14,7 14,5		17,8 18,8		17,7 17,3
<b>0,95</b>		10,9 11,8		13,9 13,4	
<b>1,10</b>	8,8 9,2		10,1 10,2		9,6 10,0

TABELA 6.10 - Resistência a compressão simples de concretos aos 91, dias em MPa.

A/(c+ad)	Cinza de Lodo Sanitário (%)				
	0	5	10	15	20
0,50	35,51		25,12		18,4
	35,70		25,23		18,2
0,65		23,7		19,8	
		23,2		19,5	
0,80	16,8		18,9		18,4
	17,2		18,6		19,3
0,95		11,8		13,0	
		12,0		13,0	
1,10	9,7		10,9		12,3
	9,3		10,3		11,4

### 6.6.1.1 Análise dos resultados

Nas TABELAS 6.11 e 6.12 apresenta-se o modelo de regressão múltipla e a análise de variância (ANOVA) para o modelo de regressão, respectivamente, dos concretos ensaiados à compressão simples. Os gráficos gerados pelas equações obtidas no modelo estão nas FIGURAS 6.1 a 6.5.

Com as variáveis codificadas conforme TABELA 6.2, os valores obtidos das constantes estimadas a partir do programa experimental e os valores-p nas variáveis independentes, foram estimados os parâmetros para o modelo de regressão múltipla que apresentam-se na TABELA 6.11.

TABELA 6.11 Análise de regressão múltipla da resistência à compressão do concreto.

Parâmetros	Coefficientes	Erro Padrão	Teste t	Valor de p
Constante	17,5446	0,291082	60,2737	0,0000
Aagl	- 8,00964	0,396678	-20,1918	0,0000
Idade	0,440769	0,291082	1,51424	0,1367
Aagl x adição	4,94735	0,509088	9,71807	0,0000
Adição	- 2,17393	0,396678	-5,48033	0,0000



No modelo desenvolvido foram mantidos os termos cuja significância estava comprovada, apresentando valor- p no teste t menor que 0,15. Pode-se observar que os valores- p , excetuando-se o referente ao parâmetro idade, são muito pequenos.

Na TABELA 6.12 apresenta-se Análise da variância da regressão da resistência à compressão do concreto (ANOVA).

TABELA 6.12. Análise da variância da regressão da resistência à compressão do concreto (ANOVA).

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de p
Modelo	2354,85	4	588,712	133,62	0,0000
Residual	207,077	47	4,4059		
Total	2561,93	51			

Onde,

SQ = Soma dos quadrados

GDL = Graus de liberdade

MQ = Média dos quadrados

F = Teste F, valor calculado

p - Nível de significância

O modelo resultante está expresso na equação 6.2

$$f_{cj} = 17,54 - 8,01 \times a_{agl} + 0,44 \times idade + 4,95 \times a_{agl} \times idade - 2,12 \times idade^2 \quad eq(6.2)$$

$$r^2 = 91,92\%$$

Onde,

$f_{cj}$  = estimativa para a resistência a compressão (MPa)

$a_{agl}$  = relação água/aglomerante em níveis codificados de -1 a 1, conforme

TABELA 6.2

idade = idade em níveis codificados de -1 a 1, conforme TABELA 6.2

adição = adição de cinza de Lodo em níveis codificados de -1 a 1, conforme TABELA 6.2

$r^2$  = coeficiente de determinação

Na análise de variância (ANOVA) do modelo de ajuste apresentada na TABELA 6.12, onde observa-se que o alto valor obtido de F rejeita a hipótese nula que o modelo é ruim, o valor-p indica que o modelo é significativo, ou seja, que existe uma relação estatisticamente significativa entre as variáveis no intervalo de confiança. O valor de p da ANOVA (TABELA 6.12) menor que 0,50, que indica que as variáveis são estatisticamente significativas com um nível de confiança de 95%.

O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) obtido foi de 0,9192, indicando que o modelo explica 91,92% dos resultados na resistência à compressão.

De acordo com o modelo, foram considerados significativos o teor de adição, a relação água/aglomerante, a idade do ensaio e a relação entre o teor de adição e a relação água/aglomerante.

Para se testar a influência isolada da adição na resistência à compressão, toma-se o valor médio dos demais termos da equação, variando-se a adição. Adota-se para este procedimento os dados da codificação da TABELA 6.2.

A FIGURA 6.1 apresenta a influência isolada do teor de adição na resistência à compressão, onde se observa uma tendência de redução da resistência do concreto com o aumento do teor de adição, com valores médios aproximados de decréscimo de 5 % para 5% de cinza, 11 % para 10%, 17 % para 15% e 22 % para 20% desta adição.

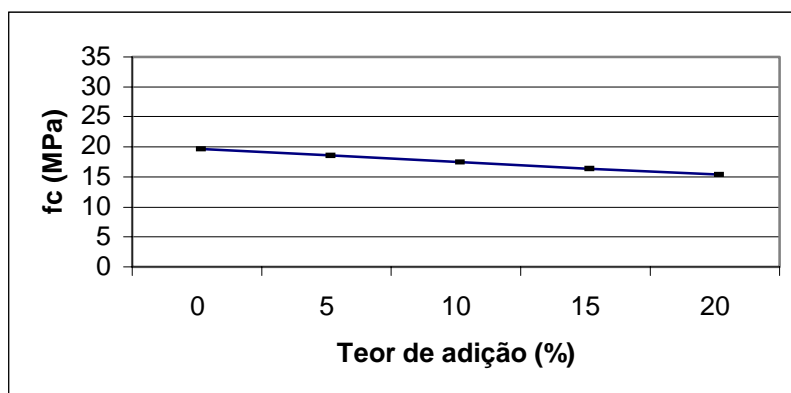


FIGURA 6.1 Influência isolada do teor de adição na resistência à compressão

Com pequenos percentuais de adição é pequena a redução na resistência à compressão. Isto se dá, provavelmente, porque a adição das cinzas em pequenos percentuais, em substituição ao cimento, pode ajudar no fechamento de poros do concreto. Como esta adição possui uma variada granulometria (3,3 a 241  $\mu\text{m}$ ), os finos podem auxiliar a que não baixe significativamente a resistência, como ocorreu com as adições de 5 e 10%.

À medida que o teor de cinza aumenta, a resistência decresce com maior intensidade, chegando-se a uma perda da ordem de até 22% para 20% de adição. Nestes casos, o consumo de cimento das misturas é muito reduzido (20%) e a adição da cinza não atenua as quedas nas resistências.

Esses resultados estão coerentes com os de outros estudos, como os efetuados por MOURA (2000), GUMIERI (2000) e GEYER (2001), onde quanto maior o teor de adição com características predominantemente fíler, com baixa ação pozolânica, menor as resistências dos concretos.

Conforme GONÇALVES (2000), adições que não possuem grande atividade pozolânica não provocam aumentos significativos na resistência à compressão.

Analisando-se sob o aspecto de aproveitamento do resíduo (cinza de Lodo) verifica-se que a adição de cinza reduz a resistência à compressão, porém, como pode ser

observado na TABELA 6.7 diminui significativamente o consumo de cimento dos concretos, o que pode viabilizar economicamente o aproveitamento do material.

Para se testar a influência isolada da relação água/aglomerante na resistência à compressão, toma-se o valor médio dos demais termos da equação, variando-se a  $a/(c+ad)$ . Adota-se para este procedimento os dados da codificação da TABELA 6.8.

A FIGURA 6.2 apresenta a influência do efeito isolado da relação água/aglomerante na resistência à compressão. Analisando-se o gráfico da FIGURA 6.2 pode-se observar a redução da resistência à compressão com o aumento da  $a/(c+ad)$ . Entre  $a/(c+ad) = 0,50$  e  $a/(c+ad) 1,10$  a redução é da ordem de 62%.

Conforme o esperado, para um concreto moldado em iguais condições de mistura, lançamento, adensamento, cura e condições de ensaio, quanto maior a relação água/aglomerante, menor a sua resistência relativa (ABRAMS, 1918; HELENE e TERZIAN, 1992; NEVILLE, 1997 e MEHTA e MONTEIRO, 1994, entre outros).

De acordo com os estudos feitos por GONÇALVES (2000), para adições de resíduo de granito ao concreto, com o aumento da relação  $a/(c+ad)$  também ocorreram reduções na resistência à compressão.

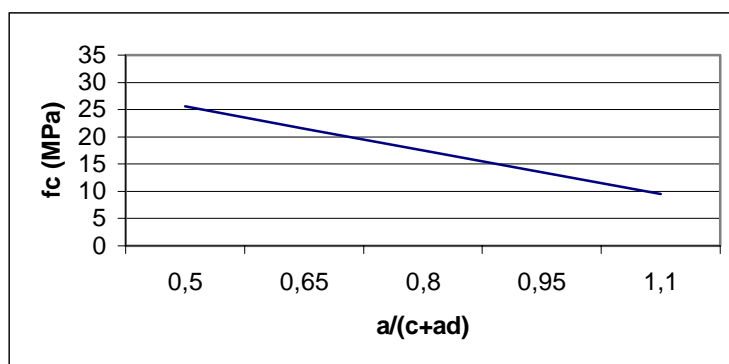


FIGURA 6.2 Influência isolada da relação água/aglomerante na resistência à compressão.

Para se testar a influência isolada da idade na resistência à compressão, toma-se o valor médio dos demais termos da equação, variando-se a idade. Adota-se para este procedimento, os dados da codificação da TABELA 6.2.

A FIGURA 6.3 apresenta o efeito isolado da idade do concreto na resistência à compressão, onde se observa que entre os 28 dias e 91 dias ocorreu um pequeno acréscimo na resistência à compressão, da ordem de 5%.

Pode-se apontar as seguintes explicações para estes resultados: primeiro, foi utilizado na dosagem o cimento ARI (CPV), o qual, por característica, apresenta grande desenvolvimento de resistência nas primeiras idades e pequeno crescimento ao longo do tempo; segundo, como a adição utilizada, conforme ensaios realizados nesta tese, não apresentou características de um forte material pozolânico e sim com maior tendência de atuar como um fino inerte, qualquer alteração nas resistências dos concretos adivindas desta adição ocorreriam nas primeiras idades e não ao longo do tempo, quais sejam efeito de filler e no fechamento do pacote granulométrico da mistura.

De acordo com HELENE e TERZIAN (1993), a evolução da resistência entre os 28 e 91 dias depende muito do tipo de cimento utilizado. Cimentos com adições pozolânicas apresentam crescimentos superiores aos de cimentos sem adições, devido ao fato de que as reações pozolânicas são mais lentas. Em concretos com cimentos sem adições pozolânicas observa-se, segundo os autores, os menores crescimentos na resistência entre estas idades.

GASTALDINI, ISAIA e ALVES (2000) compararam concretos com relação  $a/(c+ad) = 0,65$  para diferentes tipos de adições, com teores de substituição do cimento de 25%. Utilizaram cinza volante, cinza de casca de arroz e filler calcário. Obtiveram como resultados no crescimento da resistência à compressão entre os 28 e 91 dias para a adição de cinza volante 14,4%, para a cinza de casca de arroz 21,9% e para o filler calcário 4%.

GONÇALVES (2000) também comprovou em seus estudos com adição de resíduo de granito, que é um material não pozolânico, que nas idades entre 28 e 63 dias é muito pequeno o acréscimo na resistência à compressão, chegando neste período a valores médios

de apenas 4%. Este valor é próximo do obtido neste pesquisa, o que indica que a cinza não deva possuir fortes características pozolânicas.

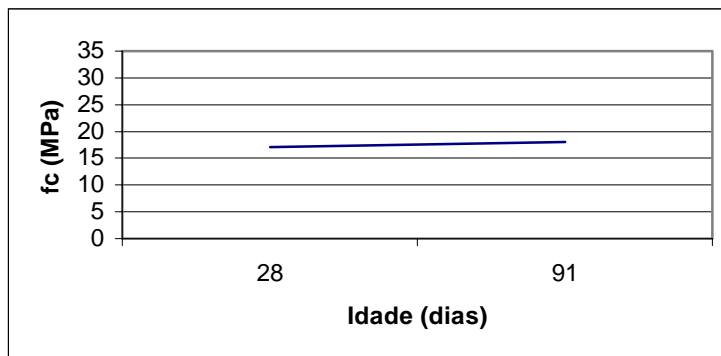


FIGURA 6.3 Influência isolada da idade na resistência à compressão.

As FIGURAS 6.4 e 6.5 mostram a influência conjunta da relação água/aglomerante e do teor de adição nas resistências à compressão. Para gerar estes gráficos foi fixada, na equação, a idade média de ensaio, variando-se a relação água/aglomerante e o teor de adição, obtendo-se a influência conjunta destes na resistência à compressão.

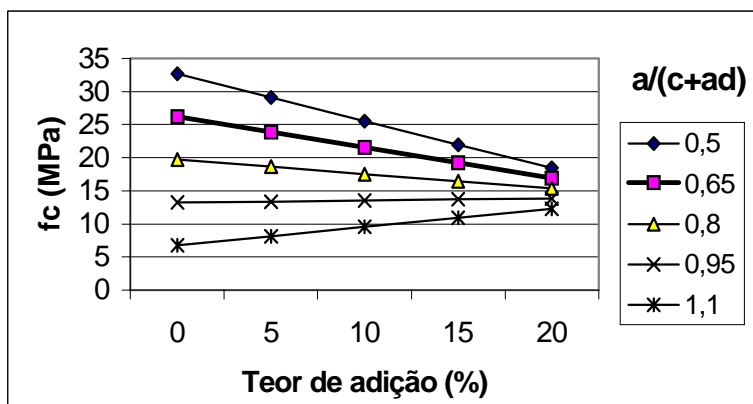


FIGURA 6.4 Influência do teor de adição para as diferentes relações água/aglomerante, na resistência à compressão simples.

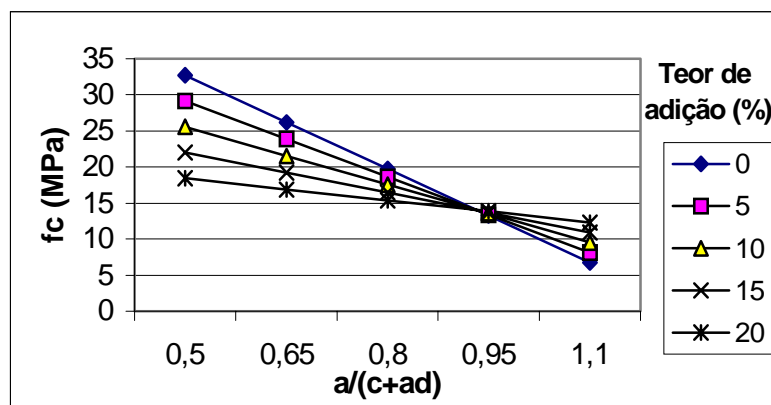


FIGURA 6.5 – Influência da relação água/aglomerante para os diferentes teores de adição, na resistência à compressão simples.

O efeito do teor de adição (FIGURAS 6.4 e 6.5) mostrou-se diferente para cada relação  $a/(c+ad)$ , sendo agente redutor da resistência nos concretos de relação  $a/(c+ad) = 0,50, 0,65$  e  $0,80$  e de efeito contrário nos concretos com  $a/(c+ad) = 0,95$  e  $1,10$ .

Os concretos com relação água/aglomerante  $0,50, 0,65$  e  $0,80$  apresentaram respectivamente, segundo o gráfico (FIGURA 6.4), comparando-se os concretos sem e com a adição de 20%, reduções nas resistências à compressão respectivamente de 43%, 35% e 22%; pode-se verificar (FIGURA 6.4) que nos concretos com relações  $a/(c+ad)$  maiores ou iguais a  $0,95$  as resistências à compressão simples foram aumentadas em função do aumento no teor de cinza utilizado na substituição do cimento. Esta tendência não é tão evidente no concreto com relação  $a/(c+ad) = 0,95$ , observando-se que a curva corresponde visualmente a uma reta horizontal, o qual apresentou, com 20% de adição, somente um acréscimo de 4% na resistência em relação aos concretos sem adição. No concreto  $a/(c+ad) = 1,10$  a reta é ascendente, o que vem a demonstrar um maior aumento de resistência. No caso, o acréscimo entre os teores de 0% e 20% de adição chega à ordem de 82%.

BONAVATTI e IRRASSAR apud GONÇALVES (2000) afirmam que no concreto endurecido, a presença de materiais finos pode ser benéfico para concretos de baixas resistências.

De acordo com SALLES et al. (1995) e PAULON et al., citados por ANDRIOLO (1998), a resistência à compressão de concretos com elevada relação água/aglomerante, como são os casos dos concretos massa e dos compactados a rolo, é aumentada com a adição de finos inertes de granulometria média menor que  $75\mu\text{m}$ , por exemplo, com adições de pós de pedra.

Sob o ponto de vista da relação  $a/(c+ad)$  e resistências mecânicas, os concretos com  $a/(c+ad)$  0,95 e 1,10, estudados nesta pesquisa, possuem características semelhantes aos compactados a rolo, por serem muito porosos, podem ter grande influência também de adições de finos.

Como foi verificado na caracterização das cinzas, apresentada no Capítulo 5, estas apresentam uma granulometria bastante variada, compostas de partículas mais finas que os grãos de cimento até grãos próximos aos dos agregados finos, e o material não apresenta grande pozolanicidade. Pode-se, considerando estes aspectos, afirmar que a adição atua no fechamento do pacote granulométrico dos concretos de maior  $a/(c+ad)$ , já que os mesmos apresentam grande porosidade e com a adição de um material com graduada curva granulométrica, como é o caso da cinza, pode-se ter um melhor empacotamento do concreto.

Já nos concretos com baixa  $a/(c+ad)$ , onde já existe uma grande quantidade de finos, representada pelo cimento e relativamente pequena quantidade de água, a substituição do cimento por esta cinza implica na redução do aglomerante, e por tratarem-se de concretos menos porosos (menor  $a/c$ ), o efeito de empacotamento, no fechamento de poros, passa a ser menos eficaz que em concretos de maior  $a/(c+ad)$ .

A análise destes resultados, isoladamente, conduz a que, sob o ponto de vista de aumento de resistência à compressão, considere-se apropriado o uso de adições em concretos com  $a/(c+ad)$  de 0,95 e 1,10. Porém, se for analisado sob o aspecto econômico e ambiental, pode-se fazer algumas considerações.



Do gráfico da FIGURA 6.4 pode-se estimar que para produzir-se, por exemplo, um concreto de 20 MPa, entre outras alternativas existentes, se poderia utilizar um concreto com  $a/(c+ad) = 0,80$  sem adições de Lodo ou um concreto com  $a/(+ad) = 0,65$  com 15% de adição. Com os dados da TABELA 6.7 observa-se que em ambos os casos os consumos de cimento seriam muito semelhantes, no primeiro caso teria-se um consumo de cimento de  $274 \text{ kg/m}^3$  e no segundo caso um consumo de  $292,4 \text{ kg/m}^3$ . Considerando-se que, na segunda possibilidade seriam consumidos  $51,7 \text{ kg de cinza/m}^3$ , estaria-se, com esta alternativa, viabilizando a disposição final segura de grande quantidade de cinza de Lodo. Esta solução apresenta-se de grande benefício ecológico e com muito pequeno acréscimo no consumo de cimento.

No caso de concretos com relação  $a/(c+ad)$  mais elevados, o uso desta adição, além dos benefícios ambientais, traria benefícios econômicos diretos. Por exemplo, para se produzir concretos com resistência à compressão da ordem de 14 MPa, poderia-se utilizar concretos com relação  $a/(c+ad) = 0,95$ , sem adição, com consumo de cimento de  $231 \text{ kg/m}^3$  ou com adições de 5%, 10%, 15% ou até 20% de cinza, de Lodo (FIGURA 6.4), obtendo-se os mesmos resultados. No caso de adicionar-se 20% de cinza o consumo de cimento seria de  $184,4 \text{ kg/m}^3$ , isto é, significando uma economia real de cimento de  $46,6 \text{ kg/m}^3$  e ainda, um grande aproveitamento do resíduo,  $46 \text{ kg/m}^3$ .

No caso de concretos com relação  $a/(c+ad) = 1,10$ , a situação mostra-se ainda mais favorável ao aproveitamento do resíduo. Por exemplo, com a adição de 20% de cinza de Lodo, aumenta-se 82% a resistência à compressão e se reduz o consumo de cimento de  $199 \text{ kg/m}^3$  para  $159 \text{ kg/m}^3$ , o que representaria uma redução de consumo de cimento da ordem de 20%. Esta alternativa traria consigo benefícios econômicos incontestáveis e ambientais muito importantes, sob diversas óticas, por exemplo quanto à disposição final do resíduo aqui estudado, quanto à preservação de recursos naturais (menor consumo de matéria prima para produção de cimento) e a significativa redução da emissão de  $\text{CO}_2$  advinda da produção do cimento.

### 6.6.2 Módulo de elasticidade

A TABELA 6.13 mostra os resultados dos ensaios de Módulo de Elasticidade aos 28 dias.

TABELA 6.13 Módulo de Elasticidade de concretos aos 28 dias, em GPa.

A/(c+ad)	Cinza de Lodo Sanitário (%)				
	0	5	10	15	20
<b>0,50</b>	21,9		19,9		15,9
	21,5		19,8		15,7
<b>0,65</b>		14,7		13,5	
		15,0		13,0	
<b>0,80</b>	13,2		16,6		16,2
	13,2		16,5		16,3
<b>0,95</b>		8,5		11,2	
		8,6		11,3	
<b>1,10</b>	8,9		10,3		8,4
	7,9		9,9		8,7

#### 6.6.2.2 Análise dos resultados

Nas TABELAS 6.14 e 6.15 apresentam-se o modelo de regressão múltipla e a análise de variância (ANOVA) para o modelo de regressão, respectivamente, dos concretos ensaiados aos 28 dias de idade.

TABELA 6.14 Análise de regressão múltipla do  $E_c$  (módulo de elasticidade do concreto).

Parâmetros	Coefficientes	Erro Padrão	Teste t	Valor de p
Constante	13,7204	0,374275	36,6586	0,0000
Aagl	- 4,925	0,51005	- 9,65591	0,0000
Aagl x adição	1,68235	0,654587	2,5701	0,0171

TABELA 6.15. Análise da variância da regressão do  $E_c$  do concreto

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de p
Modelo	363,636	2	181,818	49,92	0,0000
Residual	83,7687	23	3,64212		
Total	447,405	25			

Onde,

SQ = Soma dos quadrados

GDL = Graus de liberdade

MQ = Media dos quadrados

F = Teste F, valor calculado

p - Nível de significância

O modelo resultante está expresso na equação 6.3.

$$E_{28} = 13,72 - 4,92 \times \text{aagl} + 1,68 \times \text{aagl} \times \text{adição} \quad \text{eq(6.3)}$$

$$r^2 = 81,28 \%$$

Onde,

$E_{28}$  = estimativa para o módulo de elasticidade do concreto (GPa)

aagl = relação água/aglomerante em níveis codificados de -1 a 1, conforme

TABELA 6.2.

adição = adição de cinza de Lodo em níveis codificados de -1 a 1, conforme

TABELA 6.2.

$r^2$  = coeficiente de determinação

De acordo com o modelo, foram considerados significativos a relação água/aglomerante e a interação entre a relação água/ aglomerante e o teor de adição.

A FIGURA 6.6 apresenta o efeito isolado da relação  $a/(c+ad)$  no Módulo de Elasticidade do concreto gerado com cinza de Lodo.

Para se testar a influência isolada da relação água/aglomerante no Módulo de Elasticidade, toma-se o valor médio dos demais termos da equação, variando-se a relação água/aglomerante. Adota-se para este procedimento, os dados da codificação da TABELA 6.2.

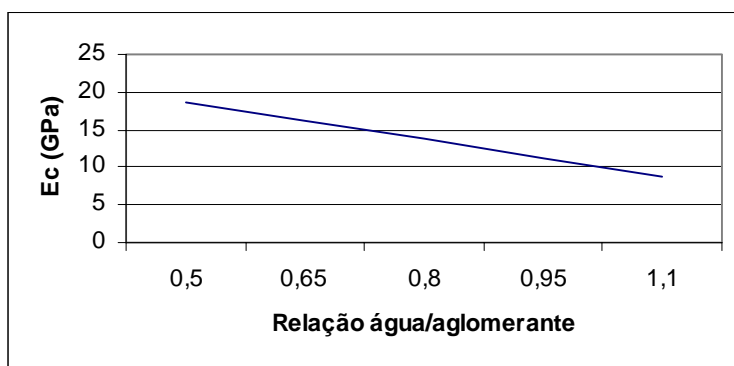


FIGURA 6.6 Influência isolada da relação água/aglomerante no Módulo de Elasticidade

Para o Módulo de Elasticidade do concreto determinado aos 28 dias, observa-se que a relação  $a/(c+ad)$  influenciou significativamente os resultados.

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994) os fatores que mais influem no módulo de elasticidade dos concretos são: o agregado, a matriz da pasta de cimento e a zona de transição.

Neste trabalho, como os agregados em todos os concretos foram os mesmos, pode-se considerar que a pasta e a zona de transição, a partir da sua porosidade, ditada pela

relação  $a/(c+ad)$ , passou a ser determinante no módulo. Isto pode ser comprovado pelo gráfico da figura 6.6.

Nos gráficos das FIGURAS 6.7 e 6.8 apresentam-se as curvas de comportamento obtidas da análise estatística através de regressão múltipla para o módulo de elasticidade em função da interação entre as relações  $a/(c+ad)$  e dos teores de adição, para os concretos com 28 dias de idade.

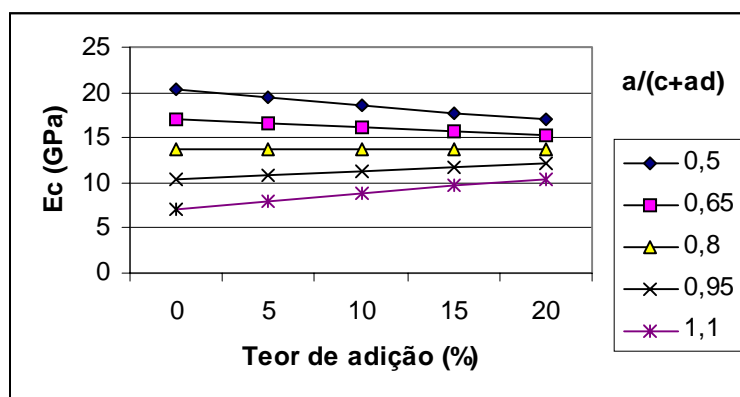


FIGURA 6.7 Influência do teor de adição para as diferentes relações água/aglomerante no módulo de elasticidade.

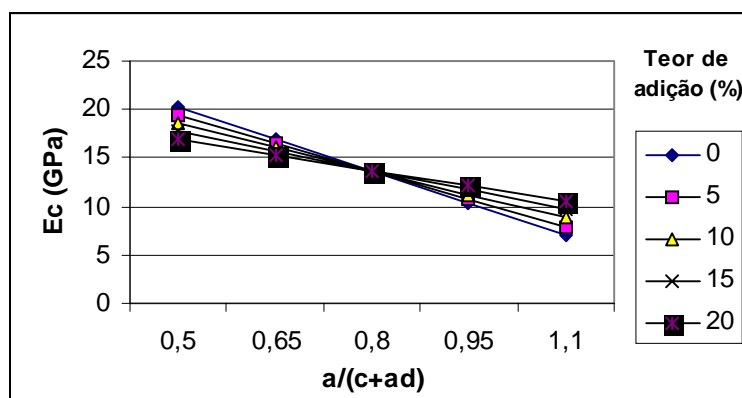


FIGURA 6.8 Influência da relação água/aglomerante para os diferentes teores de adição no módulo de elasticidade.

No módulo de elasticidade observou-se a mesma tendência dos resultados de resistência à compressão simples, com pequenas diferenças, como mostram os gráficos das FIGURAS 6.7 e 6.8, onde diferentemente dos resultados à compressão simples, não ocorrem reduções nos valores do módulo de elasticidade nos concretos com  $a/(c+ad) = 0,80$ , a medida que aumenta-se o teor de adições.

Da mesma forma que as curvas de resistência à compressão, nas  $a/(c+ad)$  0,95 e 1,10 observa-se significativos ganhos no valor do módulo, respectivamente da ordem de 20% e 60%, para adições entre 0% e 20% .

Pode-se supor que o efeito das adições nos concretos com elevada relação  $a/(c+ad)$  foi o de preenchimento dos poros do concreto, melhorando o pacote granulométrico do material, e com isto, influenciando em aumento do módulo de elasticidade.

### **6.6.3. Ensaio de profundidade de carbonatação**

Os resultados das medidas de profundidade de carbonatação são apresentados na TABELA 6.16. Estes valores referem-se às medidas das profundidades médias de carbonatação nas datas indicadas.

TABELA 6.16 – Profundidade carbonatada aos 91, 210 e 540 dias, em mm.

<b>Teor de adição</b>						
<b>a/(c+ad)</b>	<b>Idade</b>	<b>0%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>
<b>0,50</b>	91	1,3		0,9		0,4
		2,1		0,8		0,5
	210	4,1		4,0		5,0
		4,0		4,0		5,0
	540	5,4		6,9		9,0
		6,6		7,0		9,6
<b>0,65</b>	91		2,7		2,9	
			2,1		2,1	
	210		4,2		7,0	
			4,1		7,4	
	540		9,6		9,4	
			9,5		10,1	
<b>0,80</b>	91	2,5		3,2		4,9
		2,5		2,7		4,0
	210	6,0		6,0		7,3
		6,0		6,0		6,9
	540	10,2		12,6		13,0
		10,4		12,0		13,4
<b>0,95</b>	91		3,5		4,0	
			3,2		4,1	
	210		7,1		8,0	
			7,0		8,0	
	540		10,9		11,1	
			10,9		11,1	
<b>1,10</b>	91	2,6		3,2		4,4
		3,3		3,2		3,9
	210	8,0		10,2		9,0
		8,0		9,9		9,2
	540	11,1		17,9		18,9
		11,6		18,3		19,6

### 6.4.3.1 Análise dos resultados

Nas TABELAS 6.17 e 6.18 apresentam-se o modelo de regressão múltipla e a análise de variância (ANOVA) para o modelo de regressão, respectivamente, dos concretos ensaiados à carbonatação.

TABELA 6.17 Análise de regressão múltipla da profundidade de carbonatação do concreto.

Parâmetros	Coefficientes	Erro Padrão	Teste t	Valor de p
Constante	7,5446	0,152257	49,5519	0,0000
Aagl	2,69988	0,207491	13,012	0,0000
Adição	1,17257	0,2077491	5,65119	0,0000
Idade	4,09808	0,176959	23,1584	0,0000
Aagl x adição	0,534314	0,261837	2,04063	0,0450
Aagl x idade	1,329	0,241154	5,51101	0,0000
Adição x idade	0,865946	0,241154	3,59084	0,0006

TABELA 6.18 Análise da variância da regressão da profundidade de carbonatação do concreto

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de p
Modelo	1326,43	6	221,072	126,45	0,0000
Residual	124,126	71	1,74825		
Total	1450,56	77			

Onde,

SQ = Soma dos quadrados

GDL = Graus de liberdade

MQ = Media dos quadrados

F = Teste F, valor calculado

p - Nível de significância



O modelo resultante está expresso na equação 6.4

$$\text{CARB} = 7,54 + 2,70 \times \text{aagl} + 1,17 \times \text{adição} + 4,09 \times \text{idade} + 0,53 \times \text{aagl} \times \text{adição} + 1,33 \times \text{aagl} \times \text{idade} + 0,86 \times \text{adição} \times \text{idade}$$

(eq. 6.4)

$$r^2 = 91,44\%$$

Onde,

CARB= estimativa para a profundidade de carbonatação (mm)

aagl = relação água/aglomerante em níveis codificados de -1 a 1, conforme TABELA 6.2.

adição = adição de cinza de Lodo em níveis codificados de -1 a 1, conforme TABELA 6.2.

idade = idade do concreto em níveis codificados de -1 a 1, conforme TABELA 6.2.

$r^2$  = coeficiente de determinação

De acordo com o modelo, foram considerados significativos o teor de adição, a relação água/aglomerante, a idade do ensaio, a interação entre a relação água/ aglomerante e o teor de adição, a interação entre água/aglomerante e idade e a interação entre teor de adição e idade.

Na FIGURA 6.9 apresenta-se a influência isolada do teor de adição na profundidade de carbonatação.

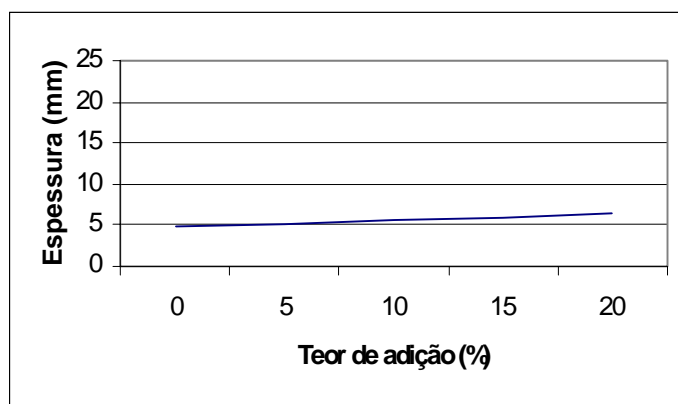


FIGURA 6.9 Influência isolada do teor de adição de cinza de Lodo na profundidade de carbonatação.

Na influência isolada do teor de adição na profundidade de carbonatação do concreto (FIGURA 6.9) observa-se que pequenos teores de adição de cinza de Lodo não alteram muito a profundidade carbonatada. No gráfico da FIGURA 6.9 obteve-se acréscimos de 8% na profundidade carbonatada para 5% de adição, 15% para 10% de adição, 23% para 15% de adição e 31% para 20% de adição.

Analisando-se isoladamente estes resultados pode-se afirmar que as adições de cinza de Lodo, em pequenos teores não interferem fortemente no aumento da profundidade carbonatada.

Conforme MOURA (2000), existe uma polêmica sobre a influência das adições minerais sobre a carbonatação. Alguns autores afirmam que adições pozolânicas aumentam a carbonatação (ISAIA, 1995), devido à redução da alcalinidade do concreto, outros já se posicionam contrariamente, afirmando que se por um lado reduz-se a reserva alcalina, por outro promove-se uma diminuição da permeabilidade do material, fazendo que este seja mais resistente ao ingresso do  $\text{CO}_2$  (MOURA, 2000).

Por outro lado de acordo com experimentos realizados por GASTALDINI, ISAIA e ALVES (2000), a adição de materiais não pozolânicos, como filer calcário em concretos, em substituição de parte do cimento, não produz benefícios quanto à profundidade carbonatada, para teores de adição de 12,5%, 25% e 50%, para relações  $a/(c+ad)$  entre 0,35 e 0,70. Os valores obtidos pelos autores, por exemplo, entre as relações  $a/(c+ad)$  0,50 e

0,70, para teores de adições mencionados, demonstraram que a profundidade de carbonatação cresceu, respectivamente, 100%, 160% e 230%.

No caso da adição de materiais pouco pozolânicos, como é o caso da cinza de Lodo, pode-se afirmar que a ação é predominantemente física, portanto a efetividade da interferência na carbonatação passa muito mais pela redução ou não da porosidade e permeabilidade do concreto.

Os resultados obtidos na carbonatação são coerentes com os obtidos na resistência à compressão, ou seja, adição de pequenos teores de cinza tem pouca influência no aumento da profundidade carbonatada, assim como também ocorre com relação à redução da resistência. A partir do teor de 10% de adição esta influência passa a ser mais efetiva nas duas propriedades, indicando, que com uma maior substituição de cimento, tem-se um aumento da carbonatação e uma redução da resistência. Este fato pode ser explicado devido à redução do consumo de cimento, aumento da  $a/c$  e conseqüentemente da porosidade e, portanto, menor formação de hidróxido de cálcio, o que não sendo compensado por uma redução dos poros, devido à adição, pode vulnerabilizar o concreto.

Na FIGURA 6.10 apresenta-se a influência isolada da relação água / aglomerante ( $a/(c+ad)$ ) na profundidade de carbonatação, onde observa-se que quanto maior a relação água /aglomerante, maior a profundidade de carbonatação. Estes resultados permitem afirmar que ao utilizar-se concretos com maior relação  $a/(c+ad)$ , que são mais porosos, permite-se um maior ingresso de  $CO_2$  e, portanto, tem-se a uma maior carbonatação, conforme esperado (VÉNUAT e ALEXANDRE, 1969 ; HO e KEWIS, 1987, entre outros).

Pode-se observar, no gráfico da FIGURA 6.10, que entre  $a/(c+ad) = 0,50$  e  $1,10$  ocorre um aumento da ordem de 100% na profundidade carbonatada. LOO et al., citado por MOURA (2000), afirmam que a relação água/ cimento ( $a/c$ ) tem a maior influência na profundidade de carbonatação, maior inclusive que o consumo de cimento na mistura, pois ela é um dos fatores determinantes da porosidade do material.

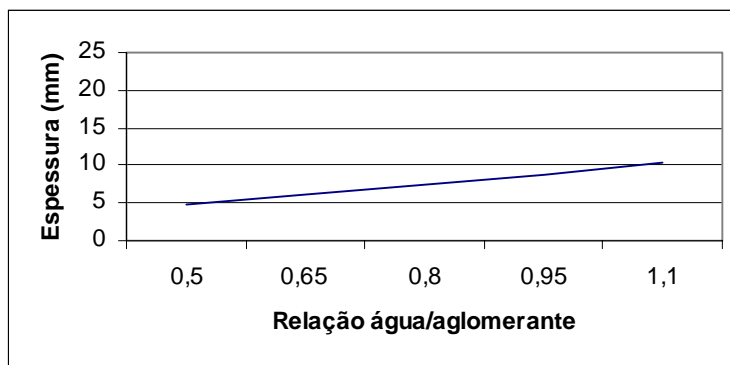


FIGURA 6.10 Influência isolada da relação água aglomerante ( $a/(a+ad)$ ) na profundidade de carbonatação

Na FIGURA 6.11 apresenta-se a influência isolada da idade de exposição ao ambiente na profundidade de carbonatação, onde verifica-se que, quanto maior a idade maior a profundidade carbonatada. Nota-se também que a partir da idade de 210 dias a declividade da reta aumenta .

Como a profundidade de carbonatação, além das propriedades intrínsecas do concreto, é função do tempo de exposição do material, os resultados encontrados na FIGURA 6.11 são bastante coerentes, ou seja, a profundidade carbonatada aumenta em função da idade do concreto.

Cabe ser ressaltado, no entanto, que a profundidade de carbonatação apresenta uma tendência de reduzir sua velocidade ao longo do tempo, ou seja, à medida que o concreto vai carbonatando, com a formação do carbonato de cálcio, tem-se um fechamento de parte do poros dos concreto, o que leva a que se tenha uma menor velocidade de carbonatação. Nos resultados obtidos, isto não foi verificado, pois a partir da idade de 210 dias tem-se um aumento da velocidade de carbonatação. Provável explicação para este fato pode ser encontrada na variação da umidade relativa do ar que a amostra experimentou ao longo do tempo. Como a umidade relativa do ar tem papel preponderante na carbonatação e os ensaios foram realizados na cidade de Goiânia, onde a umidade do ar varia significativamente em diferentes períodos do anos (INMET, 2001), a exposição da amostra a uma umidade relativa mais elevada no período após os 210 dias pode ter favorecido o aumento da velocidade de carbonatação. Conforme dados do Instituto Nacional de

Meteorologia, da idade 0 aos 91 dias a umidade relativa média foi de 57%, dos 91 aos 210 dias foi de 51%, de 210 a 360 dias foi 72% e de 360 a 540 foi de 52%.

Os valores de umidade relativa do ar médios, nos períodos acima descritos, indicam que entre 0 e 210 dias a umidade foi baixa. Entre os 210 dias e 360 dias ocorreu uma significativa elevação da umidade média, a qual pode ter sido a responsável pelo aumento da velocidade de carbonatação, constatado no gráfico da FIGURA 6.11.

Conforme o BUCHER (1989), as maiores taxas de carbonatação se dão em ambientes com umidade relativa entre 60 – 70 %. HELENE (1989) coloca também que a umidade é muito significativa na profundidade de carbonatação, indicando a faixa de maior influência entre 60% e 85%.

Conforme DAL MOLIN e WOLF (1989), a influência da umidade deve estar ligada ao equilíbrio higroscópico entre o meio e o concreto. Se o concreto possuir todos seus poros saturados de água, o dióxido de carbono não pode penetrar; ao contrário, se o concreto possuir seus poros secos, o dióxido de carbono dificilmente se ionizará, de modo que a carbonatação do concreto será realizada muito lentamente.

DAL MOLIN e WOLF (1989) analisaram diversos concretos com relação à carbonatação, em ambientes com umidades de 30%, 50%, 70 e 90% e observaram que com a umidade relativa do ar de 70 % ocorreram as maiores profundidades carbonatadas. Conforme os autores, este fato foi mais significativo à medida que aumentava-se a relação a/c. Para o cimento ARI, que também foi o utilizado nesta pesquisa, em concreto com relação a/c = 0,80, a variação da profundidade de carbonatação, entre as umidades de 50% e 70%, foi da ordem de 133% aos 28 dias de idade do concreto e de 215% aos 42 dias de idade, o que demonstra que a umidade teve, neste caso, uma influência na carbonatação muito significativa.

Os estudos de DAL MOLIN e WOLF (1989) auxiliam a justificar o comportamento apresentado pelos concretos nesta pesquisa.

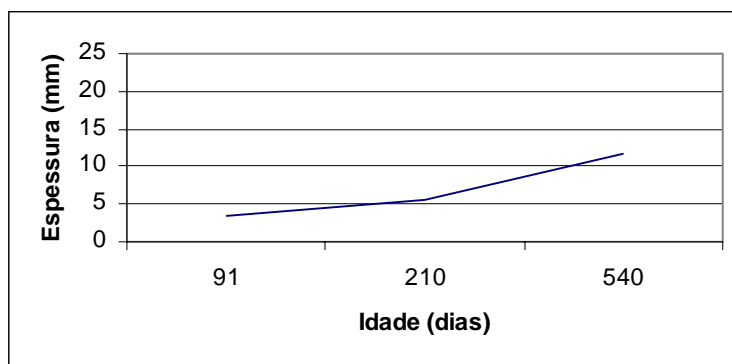


FIGURA 6.11 Influência isolada da idade de exposição do concreto ao meio ambiente na profundidade de carbonatação.

Na FIGURA 6.12 apresenta-se curvas de profundidade de carbonatação em função dos teores de adição e da idade de exposição ao ambiente.

Na influência conjunta da idade e do teor de adição observa-se (FIGURA 6.12) que nas idades de 91 e 210 dias, as profundidades de carbonatação apresentam as mesmas ordens de grandeza, e à medida que aumenta-se o teor de adição, estas também sofrem pequenos acréscimos.

Aos 540 dias de idade observa-se uma significativa relação entre o aumento do teor de adição e o aumento da profundidade carbonatada, conforme pode ser visto na inclinação da reta da FIGURA 6.12. Nesta idade, comparando-se o concreto sem adição e o com a adição de 20% de cinza, observa-se um aumento da ordem de 100% na profundidade carbonatada.

Prováveis explicações para este fenômeno podem ser devido a dois fatores, o primeiro relacionado com a umidade relativa do ar que foi superior no período após o 210 dias de exposição e o segundo com a possibilidade de existência de alguma reação pozolânica nos concretos, nas idades mais elevadas, o que devido às características da Cinza de Lodo, não pode ser descartada de existir.

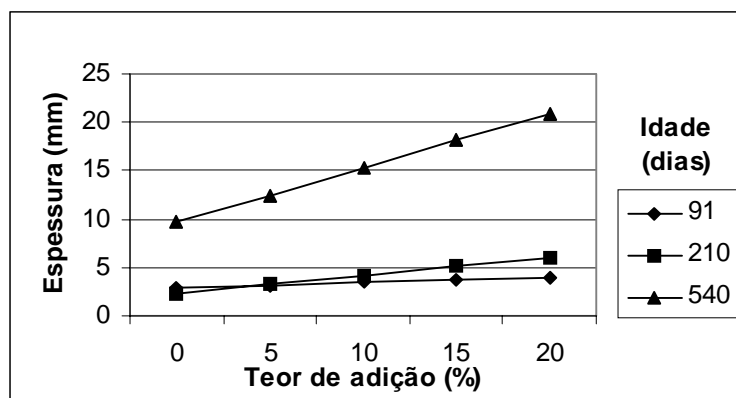


FIGURA 6.12 Influência dos teores de adição e das idades de exposição na profundidade de carbonatação.

Na FIGURA 6.13 apresenta-se as curvas de profundidade de carbonatação em função da relação água/ aglomerante e das idades de exposição dos concretos.

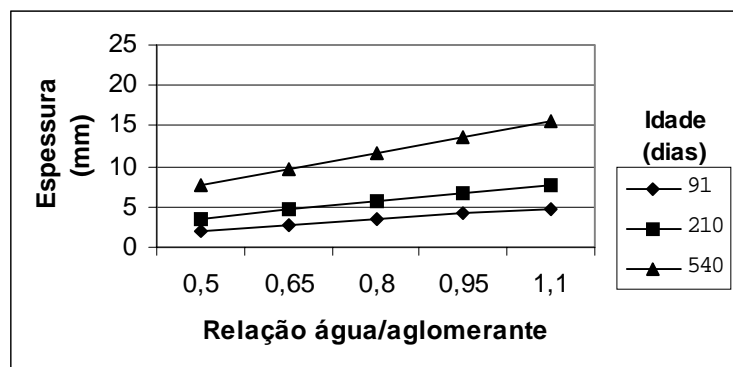


FIGURA 6.13 Influência da relação água/aglomerante e idade de exposição na profundidade de carbonatação.

Pode-se verificar com clareza que a relação  $a/(c+ad)$  tem grande influência na profundidade de carbonatação, em todas as idades analisadas, o que já havia sido demonstrado na FIGURA 6.10.

Nota-se, porém, que para os concretos com maior idade de exposição (540 dias), a relação  $a/(c+ad)$  influencia mais significativamente a profundidade carbonatada, e chega na ordem de 105% o aumento entre concretos com relação água/aglomerante entre 0,5 e 1,10.

Na FIGURA 6.14 apresenta-se as curvas de profundidade de carbonatação em função do teor de adição e da relação água/ aglomerante.

Observa-se que nos concretos com menor  $a/(c+ad)$  (0,50 e 0,65), o aumento no teor de adições gera um pequeno crescimento na profundidade carbonatada, já para as relações  $a/(c+ad)$  maiores (0,80, 0,95 e 1,10) verifica-se um maior crescimento da carbonatação em função do teor de adição.

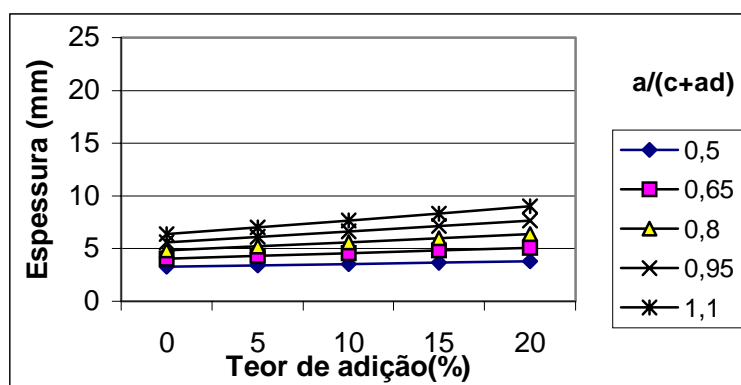


FIGURA 6.14 Profundidade de carbonatação em função do teor de adição e da relação água/ aglomerante.

Os resultados obtidos demonstram que os concretos com menores relações  $a/(c+ad)$ , que por características são menos permeáveis, não são significativamente influenciados pelas adições. Observa-se, por exemplo, que para as  $a/(c+ad) = 0,50$  e  $0,65$  as curvas são praticamente horizontais (FIGURA 6.14). Já a medida que aumenta-se a relação  $a/(c+ad)$  tem-se concretos mais permeáveis e portanto mais suscetíveis ao ataque por  $CO_2$ .



### 6.6.4 Ensaio de absorção de água

Os resultados do Ensaio de Absorção de Água por imersão, realizados na idade de 91 dias, estão apresentados na TABELA 6.19.

TABELA 6.19 – Absorção de água por imersão dos concretos avaliados

<b>Absorção de Água por imersão (%)</b>					
<b>Adição (%)</b>					
<b>a/(c+ad)</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15%</b>	<b>20</b>
<b>0,50</b>	5,94 6,02		5,88 5,96		5,60 5,66
<b>0,65</b>		7,40 7,04		6,85 6,95	
<b>0,80</b>	7,37 7,07		5,98 6,02		6,45
<b>0,95</b>		6,70 6,88		7,50 7,60	
<b>1,10</b>	6,62 6,28		6,11 6,19		7,54 7,7

Os resultados do Ensaio de Absorção de Água por capilaridade, realizados na idade de 180 dias, estão apresentados na TABELA 6.20.

TABELA 6.20– Absorção de água por capilaridade dos concretos avaliados

<b>Absorção de Água por Capilaridade (%)</b>					
<b>Adição (%)</b>					
<b>a/(c+ad)</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>
<b>0,50</b>	1,04 1,10		0,92 0,98		1,11 1,27
<b>0,65</b>		1,06 1,07		1,23 1,35	
<b>0,80</b>	0,88 0,94		0,85 0,85		1,21 1,29
<b>0,95</b>		1,14 1,20		1,21 1,27	
<b>1,10</b>	1,24 1,28		1,15 1,21		1,22 1,28

#### 6.6.4.1 Análises dos resultados

Para os ensaios de absorção de água, tanto por capilaridade como por imersão, não foi possível modelar estatisticamente os resultados e se obter curvas que fossem representativas, devido a grande variação dos resultados.

Com o objetivo de melhor observar as tendências nos ensaios de absorção de água, foram traçadas curvas com os valores reais medidos nos ensaios, nas relações  $a/(c+ad)$  em que se obteve 3 pontos de medição, quais sejam,  $a/(c+ad) = 0,50; 0,80$  e  $1,10$ . Na Figura 6.15 apresenta-se o gráfico da absorção por imersão e na Figuras 6.16 o gráfico da absorção por capilaridade.

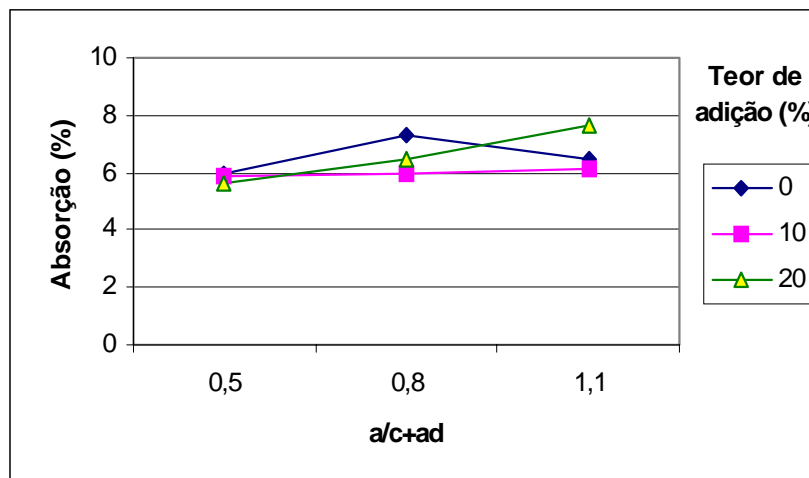


FIGURA 6.15 Variação dos valores medidos da absorção por imersão em função da relação  $a/(c+ad)$ , para as adições de 0%, 10% e 20%.

No gráfico da Figura 6.15 observa-se que, de um modo geral, a absorção por imersão cresce com o aumento da relação  $a/(c+ad)$ , como era de se esperar, pois estes são concretos mais porosos. A exceção foi o concreto com  $a/(c+ad) = 1,10$  que apresentou uma absorção menor que o de  $a/(c+ad) = 0,80$ . Este fato isolado, porém, não tem grande significância.

Na relação  $a/(c+ad) = 0,50$  não se observou influência do teor de adição, na  $a/(c+ad) = 0,80$  as adições reduziram a absorção e na  $a/(c+ad) = 1,10$ , 10% de adição reduziu a absorção enquanto com 20% esta aumentou. Estes dados não expressam nenhuma tendência clara quanto à influência das adições na absorção por imersão.

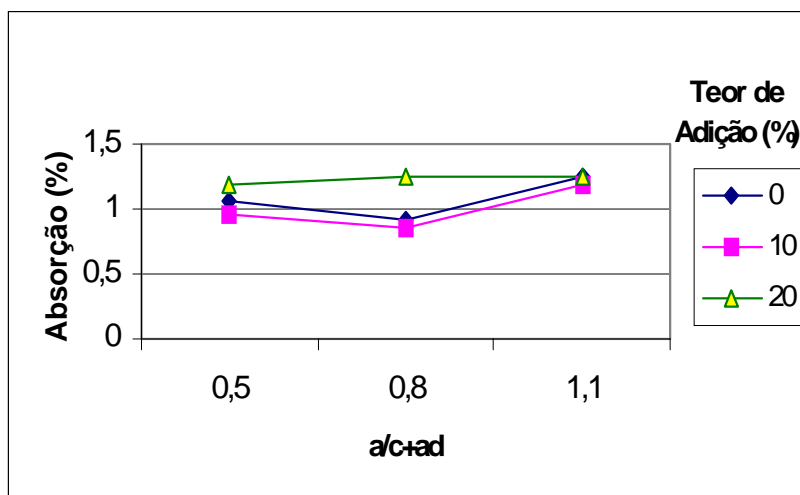


FIGURA 6.16 Variação dos valores medidos da absorção capilar em função do teor de adição para as  $a/(c+ad) = 0,50, 0,80$  e  $1,10$

De um modo geral, analisando-se o gráfico da Figura 6.16, pode-se constatar para o ensaio de absorção por capilaridade a mesma tendência observada no ensaio de absorção por imersão, qual seja, o aumento da  $a/(c+ad)$  gera aumentos nas absorções dos concretos ensaiados. Exceção ocorrida para a  $a/(c+ad) = 0,80$ , onde sem adição e com 10% a absorção reduziu.

A influência da adição na absorção capilar, de acordo com a FIGURA 6.16 não apresenta uma tendência clara e como os resultados não foram significativos estatisticamente, não se pode tirar maiores conclusões do ensaio.

A impossibilidade de modelar-se estatisticamente estes resultados atestam a pouca significância dos ensaios de absorção realizados e dificultam a interpretação dos resultados quanto ao comportamento destes concretos.

## 6.7. SOLUBILIZAÇÃO DE AMOSTRAS DE CONCRETO

Os resultados do ensaio químico na água proveniente da Solubilização são apresentados na TABELA 6.21.

TABELA 6.21 Análise físico-química da água proveniente de Solubilização

Determinações	Cinza de lodo (mg/l)	Padrões máximos para o teste de Solubilização NBR 10004 (mg/l)	a/c=1,10 Adição 0%	a/c=1,10 Adição 10%	a/c=1,10 Adição 20%
S- SO <sub>4</sub>	523,0	400,0	5,2	4,4	3,7
Cobre	0,04	1,0	0,01	0,01	0,01
Zinco	0,02	5,0	0,00	0,00	0,04
Ferro	0,03	0,3	0,01	0,01	0,01
Manganês	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01
Sódio	16,0	200,0	78,3	70,2	72,4
Alumínio	<b>0,28</b>	<b>0,2</b>	<b>0,86</b>	<b>0,98</b>	<b>1,17</b>
Fluoreto	2,2	1,5	0,0	0,09	0,10
Cádmio	0,01	0,005			
Chumbo	0,09	0,050			
Cromo	0,02	0,050			
Bário	1,00	1,0	0,0	0,2	0,14
Prata	0,02	0,05			
Cloreto	56,00	250,0	17,00	15,23	13,20
Mercúrio	0,0005	0,001			
Fenol	0,010	0,010			
N-NO <sub>3</sub> + N- NO <sub>2</sub>	0,9	10,0	0,0	0,01	0,01
Dureza CaCO <sub>3</sub>	- <b>1811,0</b>	<b>500,0</b>	<b>1910,00</b>	<b>1807,0</b>	<b>1876,0</b>
Arsênio	0,005	0,05			
Selênio	0,049	0,01			
Titânio	1,00	-	0,0	0,03	0,02
Cianeto	0,02	0,1			

### 6.7.1 Análise dos resultados

Nos constituintes do líquido solubilizado dos concretos executados com cinzas, conforme a TABELA 6.20, não se encontram os poluentes estabelecidos na Listagem 9 do Anexo I da NBR 10004 (ABNT, 1987) – Concentrações máximas de poluentes na massa bruta de resíduo, que são utilizadas pelo Ministério do Meio Ambiente Francês para classificação de resíduos como perigosos. Também não aparece nenhuma das substâncias que conferem periculosidade a um material, relacionadas na Listagem 4 do Anexo D da mesma Norma.

Os resultados destes ensaios indicam que os compostos patogênicos e perigosos presentes nas cinzas de Lodos foram retidos pela matriz de concreto.

Esta análise permite afirmar que não são lixiviados materiais poluentes destes concretos e que caso estes existam, são então retidos na massa do concreto de forma segura e estável.

A análise do teste de Solubilização dos concretos com  $a/(c+ad) = 1,10$ , com adições de 10% e 20%, de acordo com a listagem 8 do Anexo H da NBR 10004 (ABNT, 1987), mostrou que os compostos perigosos presentes nas cinzas como: arsênio, bário, cianeto, cádmio, chumbo, cromo, fenol, mercúrio, selênio e prata, não foram encontrados nos concretos com adições, ou se apresentaram em valores abaixo do máximo tolerável pela Norma para classificar o material como não inerte .

Particularmente a presença do  $\text{CaCO}_3$  (Dureza Total) e do alumínio, nos concretos, em teores superiores ao admitido para materiais inertes, se devem ao fato que no concreto sem adições estes apresentam-se em elevada concentração, significando que a presença destes compostos se deve à própria composição química dos concretos e não advindas somente das cinzas.

Os resultados obtidos no ensaio de Solubilização dos concretos com  $a/(c+ad) = 1,10$  são coerentes com os obtidos por GEYER, DAL MOLIN e CONSOLI (1998) em estudos realizados com concretos com  $a/(c+ad) = 0,65$ , ou seja, existe uma fixação de substâncias perigosas nos concretos adicionados com Cinza de Lodo Sanitário.

## 6.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS EXPERIMENTOS REALIZADOS

Analisando-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, confirma-se a variável água/aglomerante como a de maior influência na determinação desta propriedade do concreto.

A adição de Cinza de Lodo Sanitário nos concretos com  $a/(c+ad)$  0,50; 0,65 e 0,80, influenciou negativamente na resistência. No concreto com  $a/(c+ad) = 0,80$  este efeito de redução foi mais moderado. Nos concretos de  $a/(c+ad)$  0,95 e 1,10, ocorreu um aumento da resistência .

Acredita-se que isto se deva ao fato de que nos concretos com menor  $a/(c+ad)$ , que possuem um maior consumo de cimento, a substituição de um percentual deste por um material fino, de baixa atividade pozolânica, tenha sido decisiva na queda das resistências. Nestes casos, uma grande quantidade de cimento foi retirada e substituída por uma material pouco pozolânico. Cabe ressaltar ainda que em concretos com menor  $a/(c+ad)$  a substituição do cimento por um material que apresenta parte de suas partículas com granulometria muito superior a do cimento, tem sua atuação no fechamento dos poros do concreto menos eficaz.

Já nos concretos com elevada  $a/(c+ad)$ , que por características apresentam baixos consumos de cimento e muita água, a substituição de um percentual do cimento por cinzas implica em uma menor quantidade de cimento retirado, se comparada aos outros concretos. Como estes apresentam-se muito porosos, o efeito da colocação de uma material que atue no fechamento do pacote granulométrico pode ser significativo no que se refere à resistência à compressão.

O efeito das adições de cinza de Lodo, considerando-se sua granulometria média ( $33\mu\text{m}$ ), pode ser entendido de duas formas: primeiro atuando como filer, no preenchimento dos vazios deixados pelos produtos de hidratação, principalmente através das partículas mais finas das cinzas, e segundo através do preenchimento dos vazios

deixados pela descontinuidade da curva granulométrica dos agregados finos, principalmente através das partículas mais grossas das cinzas.

O efeito das adições no comportamento do Módulo de Elasticidade foi semelhante ao na resistência à compressão. Inclusive, estatisticamente, pode-se observar que já ocorrem melhorias a partir dos concretos com  $a/(c+ad) = 0,80$ .

As adições promoveram um significativo aumento da profundidade de carbonatação de todos os concretos, independentemente da  $a/(c+ad)$ , principalmente nas idades mais elevadas.

Os resultados dos experimentos realizados em concretos indicam que o teor de Adição de Cinza de Lodo influencia diretamente na resistência à compressão e na profundidade de carbonatação. De uma forma geral a resistência decresce à medida em que aumenta-se a adição, enquanto a carbonatação cresce em função desta. Pode-se explicar estes fatos porque sendo parte do cimento substituído por um material inerte (cinza de Lodo), diminui-se a quantidade de cimento na mistura e mantêm-se a mesma quantidade de água, aumenta-se a relação  $a/c$ , tornando o concreto mais poroso e, portanto, menos resistente a esforços mecânicos. Também o ingresso de agentes agressivos, como o  $CO_2$ , passa a ser facilitado pela maior porosidade. Para baixos teores de adições este efeito não é tão forte, o que pode ser consequência da atuação da adição no fechamento de poros do concreto, o que contribuiria para a redução da porosidade, nestes casos.

A relação água/aglomerante ( $a/(c+ad)$ ) influencia significativamente a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a carbonatação. A medida que aumenta-se a  $a/(c+ad)$ , reduz-se significativamente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade enquanto a profundidade carbonatada é aumentada. Existe uma coerência nestes três resultados por que ao aumentar-se a relação  $a/(c+ad)$ , esta se aumentado a porosidade do material e, portanto, tornando este menos resistente e mais vulnerável aos ataques por agentes externos.

A influência conjunta da relação  $a/(c+ad)$  e do teor de adição de cinza de Lodo na resistência à compressão e no módulo de elasticidade mostrou-se bastante semelhante, isto é concretos com relação  $a/(c+ad)$  baixas tiveram reduzidas estas propriedades, enquanto com relações maiores que 0,80 apresentaram incrementos com as adições.



A idade de ensaio nos concretos influenciou nos resultados da resistência à compressão e na profundidade carbonatada. A resistência foi aumentada entre os 28 e 91 dias, porém os valores são pequenos para que se possa identificar a ocorrência de alguma reação pozolânica. A profundidade de carbonatação, que por definição é função do tempo, teve grande incrementos entre as idades de 91, 210 e 540 dias, tendo no último intervalo um maior acréscimo, devido provavelmente a ter sido fortemente influenciada pela maior umidade relativa do ar neste período.

Os ensaios de Absorção por Imersão e por Capilaridade não foram estatisticamente significativos, e portanto tem sua significância questionada.

Estudos anteriormente realizados por TAY (1987), GEYER, CONSOLI e DAL MOLIN (1998), em concretos com relações  $a/(c+ad) = 0,50$ , indicavam que a utilização de cinzas de Lodo Sanitário como adições, no que se refere à resistência à compressão do concreto, eram prejudiciais. Em todos os casos ocorriam significativas reduções de resistência à medida que fossem aumentados os teores de adições. Isoladamente estes estudos indicavam que este material não seria indicado para uso em concretos. Porém, com os resultados obtidos nos experimentos desta pesquisa, nos quais analisou-se uma faixa grande de relações  $a/(c+ad)$ , detectou-se que para determinados concretos pode ser positiva a substituição parcial do cimento por estas cinzas. Em concretos a partir da  $a/(c+ad) = 0,65$  pode-se obter benefícios ambientais com a substituição de parte do cimento, ou seja pode-se dispor razoáveis quantidades de cinzas no concreto, sem grandes acréscimos de consumo de cimento; nos concretos com  $a/(c+ad)$  acima de 0,95 ( $f_c \sim 15$  MPa), já observa-se vantagens econômicas e técnicas com a adição de cinzas, com a redução no consumo de cimento e melhorias nas propriedades mecânicas dos concretos.

A utilização destas adições em concretos não estruturais e de baixa resistência pode, então, ser considerada com viável, pois estes poderiam ser enquadrados naqueles em as adições tem efeito benéfico ou não interferem.

Considerando-se, por exemplo aqueles, concretos em que os efeitos das adições quanto à resistência e o módulo são positivos, quais sejam os de  $a/(c+ad)$  entre 0,80 e 1,10, o efeito negativo do aumento da profundidade de carbonatação passa a ser minimizado quanto ao desempenho destes quando das suas utilizações em obras não estruturais.

Na medida em que nos concretos não armados o efeito da carbonatação na durabilidade não é determinante, pode-se considerar que o aumento de resistência promovido pelas adições configura-se em uma melhoria da qualidade dos materiais.

No que se refere à disposição final segura do resíduo no concreto, a análise ambiental realizada através do ensaio de Solubilização demonstrou que, ao não serem solubilizados compostos nocivos nos concretos com adições, que o concreto fixa de forma estável os poluentes contidos na Cinza de Lodo Sanitário.

## **7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Esta Tese teve como principal objetivo estudar a possibilidade de disposição final segura dos Lodos de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários da Cidade de Porto Alegre, utilizando-se o material, incinerado, como substituto parcial do cimento na produção de concretos, adotando-se como base para o trabalho os resíduos gerados na ETE IAPI desta cidade, após terem sido incinerados à temperatura de 800 °C .

Dois fatores tem sido preponderantes na escolha desta alternativa: o ambiental, no que se refere à disposição final segura deste resíduo, e o econômico, através da utilização deste material como insumo para algum produto, fazendo com que o resíduo passe a ter característica de subproduto.

As conclusões aqui apresentadas, apesar de estarem em consonância com grande parte da bibliografia existente, não devem ser tomadas de forma absoluta, pois se referem somente aos dados obtidos de concretos que utilizam tipos, quantidades e qualidades específicas de materiais e técnicas de execução. Sua representatividade deve ser firmada através da execução de novas pesquisas que apresentem resultados que possam complementar e confirmar os dados obtidos neste estudo.

### **7.1 CONCLUSÕES**

As principais conclusões da caracterização das cinzas do Lodo Sanitário da ETE IAPI, no que se refere ao potencial de aproveitamento destas, são:

- Os compostos químicos presentes na cinza conferem ao material potencial químico e físico para ser utilizado no concreto, como adições em substituição parcial do cimento Portland.
- Através dos ensaios de difração de raios X e da Microscopia Eletrônica de Varredura pode-se entender que o material é formado basicamente por grãos de quartzo sobre os quais se depositam outros compostos muito finos formados principalmente por sílica, cálcio, ferro e alumínio, predominantemente cristalinos;

- O índice de pozolanicidade de cinzas incineradas e destorroadas, cinzas peneiradas e cinzas moídas foram muito semelhantes e próximos ao estabelecido pela Norma brasileira de Materiais Pozolânicos, o que não caracteriza o material como uma pozolana forte ;
- Na caracterização ambiental da Cinzas de Lodo da ETE IAPI pôde-se classificar o material como Classe II - Resíduo Não Inerte, formado por alguns compostos patogênicos e perigosos, o que reforça a necessidade de cuidados com a sua disposição final.

As possibilidades de aproveitamento do resíduo incinerado como adição ao concreto são bastante possíveis com base nas características do material.

Os resultados de experimentos realizados adicionando-se a cinza obtida à 800 °C a concretos devem ser compreendidos sob os seguintes aspectos: primeiro quanto à possibilidade do resíduo ser utilizado no concreto, e segundo se esta matriz é segura para disposição final do material.

O programa experimental realizado nesta pesquisa com o objetivo de verificar a possibilidade do aproveitamento do resíduo no concreto trouxe as seguintes resultados quanto aos concretos produzidos:

- Concretos com relações  $a/(c+ad)$  0,5, 0,65 e 0,80, adicionados com cinza de Lodo, não apresentaram desempenhos mecânicos satisfatórios, resultando em grandes quedas de resistência e no módulo de elasticidade à medida em que se substituiu parte do cimento por cinza de Lodo. Estas reduções foram proporcionais aos teores de adições colocados;
- Nos concretos com relações  $a/(c+ad)$  0,95 e 1,10 as características quanto ao desempenho mecânico foram satisfatórias, apresentando, em alguns traços significativos acréscimos na resistência à compressão e no módulo de elasticidade;
- Em alguns traços de relação  $a/(c+Ad)$  0,65 e 0,80 já podem ser observados significativos benefícios, no que se refere a não interferência negativa das adições e, portanto, a possibilidade de seu aproveitamento. Nos concretos com relações  $a/(c+ad)$  0,95 e 1,10 observa-se grandes benefícios técnicos (aumento da resistência à compressão), econômicos ( redução do consumo de cimento) e ambiental ( preservação de recursos naturais, menor emissão de CO<sub>2</sub> e principalmente aproveitamento do resíduo).

- Quanto à durabilidade destes concretos pode-se afirmar que se utilizados para obras não estruturais, não foram observadas, com base nos experimentos realizados, restrições ao seu aproveitamento;

Os resultados obtidos no programa experimental quanto ao aspecto ambiental ou seja, quanto à capacidade do concreto em reter de forma segura os compostos nocivos presentes na cinza foram :

- os ensaios de solubilização realizados em amostras de concretos com adição de cinza de Lodo mostraram resultados muito positivos, ou seja, os compostos perigosos ou patogênicos presentes nas cinzas não foram lixiviados dos concretos, podendo-se admitir que a matriz concreto estabilizou e fixou de forma segura estes materiais.

## **7.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

Sugere-se continuar os estudos nesta área, ampliando para as novas estações de tratamento de esgotos que estão sendo instaladas na cidade de Porto Alegre, além de outras cidades que, a exemplo desta, estão ampliando seus sistemas de esgotamento sanitário.

A variável temperatura de incineração, fixada nesta pesquisa, pode para outros sistemas, onde os incineradores possibilitem queimas em diferentes temperaturas, permitir avaliar-se a influência da temperatura de queima no potencial de utilização do resíduo para o fim proposto, o que para a cidade de Porto Alegre, como já estão especificados os equipamentos, não foi possível de ser realizado.

Quanto às possibilidades de utilização das cinzas em concretos, que neste trabalho mostram-se restritas a concretos de baixa resistência, sugere-se estudos com adições ternárias, onde a composição de cimento, cinza de Lodo e outras adições, por exemplo pozolânicas, podem ser benéficas ao comportamento do material produzido. Também a utilização da cinza de Lodo como adição ao concreto e não como substituto parcial do cimento pode ser investigada, no sentido do aproveitamento do material.

As questões de durabilidade para aqueles concretos que apresentaram bom desempenho mecânico com as adições devem ser analisadas de forma diferente de concretos estruturais, porque estas relações  $a/(c+ad)$  são típicas de concretos não

estruturais, onde os problemas de corrosão das armaduras, por exemplo, que seriam influenciados pela carbonatação, nestes casos não existem.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMS, D. A. **Design of concrete mixtures**. Chicago, Structural Materials Research Laboratory – Lewis Institute, Bulletin 1, Dec. 1918.
- ACE PLAN – **Areawide Sewage Sludge Treatment And Disposal Project**. Japan Sewage Works Agency. 10p. Tokyo, 1990.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI COMMITTEE 201- **Guide to Durable Concrete (ACI 201.2R-77)** ACI Manual of concrete Practice 1988.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI COMMITTEE 212- **Guide for Use of Admixtures in Concrete** .- Manual of Concrete Practice, par.I, 1985, p. 212.2R-1 – 212.2R- 13.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI COMMITTEE 363- **State-of-the-Art Report on High Strength Concrete**. Journal of the ACI, Vol. 81 n. 4, 1984, p. 364-411.
- AGOPYAN, V. Uso de Resíduos na Indústria da Construção. Palestra no Sustainable Cosntruction. In: Next Millennium: Environmentally Friendly And Innovative Cement Based Materials. **Proceedings...** João Pessoa, 2 a 5 de nov., 2000.
- AGOPYAN, V. e MORALES, G. **Caracterização do Agregado Leve a partir do Lodo de Esgoto da Cidade de Londrina**. Bol. Téc. EPUSP, BT/PCC/64, São Paulo, 1992
- AGOPYAN, V. – **Em Busca da Construção Limpa**. Boletim Informativo da Associação Brasileira de Cimento Portland. Ano IV N. 29, agosto de 2000, São Paulo.
- ALLEMAN, J.E. e BERMAN, N.A. **Constructive sludge management: Biobrick**. Journal of Environmental Engineering, vol.110, N. 2, April, 1984.
- ALLEMAN, J.E.; BERMAN, N. A. e PROUTY, M.F. – **Solidification, Encapsulation and Stabilization of Industrial Wastes.**, Maryland, 1983.
- ALMEIDA, I. R. **Betões de alta resistência e durabilidade – composição e características**. Lisboa, 1990. e40p. : Tese (Doutorado em Engenharia) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC - Portugal

- ALVES, J. D. **Materiais de construção**. Goiânia: UFG/CEFET, 1999. 298p.
- ANDRADE, W. P. et al – **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaio e propriedades**. ED Pini. São Paulo, 1997.
- ANDRIOLO, F. R. – **The Use of Roller Compacted Concrete**. – ED. Oficina de Textos. São Paulo, 1998.
- ANDREOLI, C. V. et al. **Reciclagem de Biossólidos : Transformando Problemas em Soluções**. Curitiba, SANEPAR, FINEP, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Revisão da NB 1 comentários**. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5734 **Peneiras para ensaio**. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5739 **Ensaio de compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5743 **Cimento Portland : Determinação de Perda ao Fogo**. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5744 **Cimento Portland : Determinação de Resíduo Insolúvel**. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5745 **Cimento Portland : Determinação de Anidrido Sulfúrico (SO<sub>3</sub>)**. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5747 **Determinação de Óxido de Sódio e Óxido de Potássio por Fotometria de Chama**. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5752 **Pozolanas – Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland**. Rio de Janeiro, 1977.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7215 **Cimento Portland: Determinação da Resistência à Compressão**. Rio de Janeiro, 1996.



- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7217 **Agregados: determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 1987
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7224 **Cimento Portland e outros materiais – Determinação da área específica.** Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7227 **Cimento Portland : Determinação do Óxido de Calcio Livre pelo Etileno Glicol.** Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7251 **Agregados em estado solto: determinação da massa unitária.** Rio de Janeiro, 1982
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 8522 – **Concreto- Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão-Deformação.** Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 9203 **Cimento Portland Comum e Clínquer: Análise química por Complexometria.** Rio de Janeiro, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 9776 **Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco de Chapmann.** Rio de Janeiro, 1987
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 9778 **Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção de água por imersão.** Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 9779 **Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 9937 **Agregados: determinação da absorção e da massa específica de agregado.** Rio de Janeiro, 1987

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 10004 **Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 1987
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 10005 **Lixiviação de Resíduos - Procedimentos**. Rio de Janeiro, 1987
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 10006 **Solubilização de Resíduos - Procedimentos**. Rio de Janeiro, 1987
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 10007 **Amostragem de Resíduos - Procedimentos**. Rio de Janeiro, 1987
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 11578 **Cimento Portland Composto**. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 11581 **Cimento Portland: Determinação dos Tempos de Pega**. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 12653 – **Materiais Pozolânicos**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 12821 **Preparação de Concreto em Laboratório**. Rio de Janeiro, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR NM 23 **Cimento Portland: Determinação da Massa Específica**. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR NM 76 **Cimento Portland: Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método Blaine)**. Rio de Janeiro, 1998.
- ABREU, J.C.e CARNEIRO, F.A. V. Emprego de escórias siderúrgicas na Engenharia civil. In: 49 Congresso da ABM, São Paulo, 19--.
- AZUMA, S. **Concept pf compressiom processes for the disposal of refuse in the Osaka city**. The Municipal Government of Osaka. Osaka, 1973.
- AZIZ, M. A. e RAMASWAMY, S. D. Incinerator Residue for Roads In: **Geotechnical Testing Journal**, GTJODJ, Vol. 15. N. 3, September 1992, pp. 300-304.

- BARTH, E. F. et. Al. **Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes**. Noyes Data Corp. Park Ridge, New Jersey, 1990
- BHATTY, J.I. e REID, K. Compressive Strength of Municipal Sludge Ash Mortars. In: **ACI Materials Journal**, 1989.
- BIER, T.A. – **Influence of cement and curing on carbonatation progress and pore structure on Hydrated cement pastes**. Boston 1986
- BENSON, R.E.; ASCE, M.; CHANDLER, H.W.; ASCE, A. M. e CHACEY, K. A. – “Hazardous Waste Disposal as Concrete Admixture. In : **Jounal of EnvironmentalEngineering**, vol.111, N. 4 , 1985.
- BIO – Revista da associação Brasileira de Engenharia Ambiental. – Ano IX n.3, jul-ago 1997, pp. 24-25, São Paulo.
- BROSCH, C. D. Produção de Agregado Leve à partir fo Lod do Esgoto. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, 1975
- BUCHER, H. R. E. A carbonatação do concreto na corrosão da da armadura. In 31<sup>a</sup> Reunião do IBRACON. **Anais...** São Paulo, SP 31-4 ago, 1989.
- CACERES, L. Comparison of lime and alum treatment of municipal wastewater. In: 2<sup>nd</sup> Conference of the IAWQ-IWSA Joint Specialist Group on Coagulation, Flocculation, Filtration, Sedimentation and Flotation. **Proceedings...** Geneve. SWITZ. Water Science and Technology v.27 n.11 pp.261-264. 1993
- CANOVAS, M. F. **Hormigon**. Madrid, 1996
- CASTRO, P. B. et al.– **Corrosión en estructuras de conctrteo armado**. IMCYC, México, 1999.
- CHANEY, R. L. e STEWART, B.A. - **Heavy Metal Acumulation**. Rodale, Emmaus,USA, 1977.
- CINCOTTO, M. A. et al. **Cimento alternativo à base de escória de alto-forno**. A Construção – Região Sul. N. 259, p.23-26. Mai. 1990
- CINCOTTO, M. A. et al. **Caracterização da escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado**. IPT. São Paulo, 1989.

- CLÁUDIO, J. R. **Resíduos sólidos perigosos. Solidificação de lamas tóxicas com cimentos.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da USP, 1987.
- CHRISTENSEN, G.L. - Lime stabilization of **wastewater** sludges. ASTM STP 931. K. A. Gustschick Ed American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1987.
- CAÑAS M. L. M. **Analisis del comportamiento mecánico del hormigon de alta resistência mediante probetas testigo y probetas moldeadas com distintas condiciones de hormigonado.** Madri. 1997. Tese (Doutorado). Universidade de Madri.
- COSTA, H.R. e FERREIRA, C. F. **Introdução de Lodos Industriais Contendo Metais Pesados em Tijolos Cerâmicos.** Revista Engenharia Sanitária, p.352-354. Rio de Janeiro, 1986.
- COLLINS, R.J. – Highway Constrution Use of Incinerator Residue In: **Geotechnical practice for disposal of solid waste materials**, Michigan, 1997 pp246-268
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **Durability of Concrete Structures: state of the art report.** Paris, 1982.
- COUTINHO, A.S. – **Fabrico e Propriedades do Betão.** Vol. 1. 2º Edição – LNEC, 1988, 401pp
- DAL MOLIN, D. C. C. e WOLF, J. Carbonatação de Argamassas e concretos: Fatores Intervenientes In: Simpósio sobre Patologia das Edificações – Prevenção e recuperação **Anais...** Porto Alegre, RS. Out 1989.
- .DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo de propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica.** São Paulo, Sp. 1995, 286p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- DAVIS R.D. - **Agricultural Utilization of Sewage Sludge.** J.JWEM, 3, 351 - 355
- DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS DMAE. **Normas gerais para Ensaios.** Divisão de Pesquisa do Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre, Porto Alegre, 1978.

- DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS DMAE. **Relatório de atividades anuais do Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre.** Porto Alegre, 1994.
- DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS DMAE. **Plano Plurianual de investimentos do Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre.** Porto Alegre, 1995.
- DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS DMAE. **Plano Diretor de Esgotos. Elementos para seleção e composição do sistema de tratamento e elevatórias de esgoto.** Porto Alegre, 1996
- ENGENHARIA SANITÁRIA. **Avaliação dos processos de tratamento e destinação dos Resíduos Sólidos.** Rio de Janeiro. Vol.16, p82-103, 1977.
- ENVIRONMENT BUREAU OF KITAKYUSYU. **Hiagari incineration facility city of Kitakyusyu.** Japan, 1987.
- FARREL, J.B. et al. Lime Stabilization of Primary Sludges In: **Journal of the Water Pollution Control Federation.** pp78-94, 1974
- FELIACIANO, D. V. Bringing About an End to Ocean Dumping. In: **Journal of Water Pollution Control Federation,** USA 1981.
- GASTALDINI, A.L. , ISAIA, G. C e ALVES, A. S. – Concrete Carbonation With Fly Ash, RICE Husk Ash And Calcareous Filler.. In: Sustainable Construction into next millennium: Environmentally friendly and innovative cement based materials. **Proceedings...** João Pessoa , Brazil. 2000, I, 151-164.
- GENAZZI, C. – Physical and Chemical Properties of Portland Cement Mortars Incorporating Hospital Waste Fly Ash. Cosntruction. In: Next Millennium: Environmentally Friendly And Innovative Cement Based Materials. **Proceedihgs...**João Pessoa, 2 a 5 de novembro de 2000, p. 436-449.
- GEYER, A. L.B., RECENA, F.P. e SCHURER, A. **Caracterização dos Lodos de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários de Porto Alegre,** CPGEC - UFRGS, 1995.

- GEYER, A. L.B., CONSOLI, N. C. e DAL MOLIN, D. C. – Recycling of sewage sludge from treatment plants of Porto Alegre city, Brazil, and its use as na admixture in concrete. In: Challenges for concrete in the next millennium. **Proceedings...**Amsterdam, maio/1998.
- GEYER, A. L. B., CONSOLI, N. C. e DAL MOLIN, D. C. – Reciclagem de lodos de estações de tratamento de esgotos sanitários da cidade Porto Alegre e seu uso como adição ao concreto. Gramado, 1997.
- GEYER, A. L. B., CONSOLI, N. C. e DAL MOLIN, D. C. – Possibilidades de utilização de lodos sanitários como insumo na produção de concretos.In: Congresso de Engenharia Civil. **Anais...** Juiz de Fora, 1998.
- GEYER, A. L. B., CONSOLI, N. C. e DAL MOLIN, D. C. – Possibilidades de utilização de lodos sanitários como insumo na produção de concretos. In: 40º REIBRAC. **Anais...** Rio de Janeiro, 1998
- GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto.** Porto Alegre, 2001, 190p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- GONSALVES, A. F. – **Resistência do Concreto nas Estruturas.** Tese, LNEC, Materiais de Construção, Out.1987, 369pp.
- GONÇALVES, J. P. – **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** Dissertação de Mestrado apresentada à Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 113 p., Dezembro de 2000.
- HASPARK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação alcali-agregado – efeito da cinza da casca de arroz e da sílica ativa.** Dissertação de Mestrado apresentada na UFG, Goiânia, 1999 257pp..
- HELENE, P. R. L. Envelhecimento das superfícies de concreto aparente e produtos de proteção. In: IX Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção: Reforços, Reparos e Proteção das Estruturas de Concreto. **Anais...** São Paulo, SP. Mai. 1989.

- HELENE, P. R. L e TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI, 1993
- HOLLAND – **Holland Availability Test: Waste Materials, construction materials and satbilized waste products**. Concept Dutch Standard NVM 5432, 1991.
- HO, D. W. S. e LEWIS, R. K. **Carbonatation of Concrete and Its Prediction**. Cement and Concrete Research, v17. N. 3, 1987, p. 489-504.
- IDE, C. N. **Eficiência da estabilização de lodos de ETEs com cal e ferrato de potássio. Curso de Pós- Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento- UFRGS**, 1994.
- IMHOFF, K.R. – **Desenvolvimento da Estações de Tratamento de Esgotos . In: Manula de trtamento de águas residuárias**. São Paulo, Edgard Blucher, 1986.
- IRASSAR, E.F.; BONAVETTI, V.L.; DONZA, H.; CABRERA, O.- Mechanical Properties and Durability of Concrete Made With Portland Limestone Cement. Proc. Sustainable Construction. In: Next Millennium: Environmentally riendly and Innovative Cement Based Materials. **Proceedings...** João Pessoa , Brazil. 2000, I, 200-216.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEREOLOGIA – **Boletim de tempratura e umidade relativa do ar nas capitais brasileiras**. INMET, Brasília, 2001
- ISWA – Conferência Anual da International Solid Wastes and Public Cleasing Association. **Proceedings...** Amsterdam, setembro de 1990.
- JAPAN SEWAGE WORKS AGENCY. **Areawide Sewage Sludge Treatment And Disposal Project**. Tóquio, 1990.
- JARNIS, R. N. e VICKRIDGE, I. G. **Characterization of Waste water Sludges for ultimate disposal**. Nanyang Technological Insdtitute, Singapore, 1984.
- JAPANESE ENVIROMNENT AGENCY STANDARD -JEA. **The six codes of law for the environment**, Tokyo, 1996.
- KANEZASHI, T. e MURAKAMI, T. **Sludge Tratment – Regional response cases disposal crisis**. p28. WQI n. 3199, 1991.
- KASAI, A. **Combustion gas volume from incinerator**. Sankikogyo Co. Ltd, 1983

- KUBOTA MELTING FURNACE. **Incinerator for Sewage Sludge**. Catalogo técnico, Tóquio, 1995.
- KATO, H. e TAKESUE, M. – Manufacture of artificial fine lightweight aggregate from sewage sludge by multi-stage stream kiln. In : International . Conference of Recycling. **Proceedings...** Berlin, Germany, 1984.
- KAWAI, T. **Recent Advaced Concrete Technology**. In: Seminar On Practical Application of Construction Technology. 12 p. Tokyo, jun. 2000.
- KKANBIVARDI, R. e AFSHARI, S. – Sludge ash as fine aggregate for concrete mix. In: J. Env. Eng. Div. **Proceedings...** ASCE n. 121, pp. 633-638, 1995.
- KITA ENVIROMENTAL COOPERATION CENTER. **Waste Disposal in Japan. Kitakyushu**, Japão, 1995.
- KESTENBACH, H. J. e BOTTA FILHO, W.J. **Microscopia eletrônica: transmissão e varedura**. São Paulo/SP: Associação Brasileira de Metais (ABM), 1989. 103p
- KORCHI, T. et al. The effect of chloride, sulfate and seawater solutions on the expansion and cracking of Portland cement stabilized cadmiun hazardous waste. In: BAYLES, J. et al. **Proceedings...** Ninth International Conference on Cement Microscopy, Nevada, april 1987.
- LABAHN, O. **Cement Engineers Handbook. Bauverlag GmbH**, Berlin, Gernamy, 1983.
- LUCERO, R. e MALINA, J. F. – The Effect of Standard Municipal Sludge Treatment Processes on the Reduction of Indicator and Pathogenic Organisms. In: 71<sup>st</sup> Annual Conference e Exposition of Water Environment Federation. **Proceedings...** Orlando, USA, October 3-7,1998.
- LUDUVICE, M. **Wet Air Oxidation of Organic Sludges at Low Oxygen Overpressure**, Phd Thesis, Newcastle University, 1992, England.
- MALINA, J. Sludge Stabilization. In: Tratamento e destino final do Lodo. In: Seminário de Transferência recnológica. **Anais...**ABES/WEF, Rio de Janeiro, 1993.
- MARAGNO, A. L. F. C. e POVINELLI, J. – **Solidificação de lodo gerado em curtumes em matrizes de cimento**. ABES, 1992



- METCALF e EDDY, INC. **Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse**. Third Edition, New York 1992.
- METCALF e EDDY, INC. **Desing of Facilities for the treatment and Disposal of Sludge**. In : Wastewater Engineering, New Yoyk, Mc Graw-Hill, 1991.
- MALHOTRA, V. M. et al. . **Supplementary Cementing Materials For Concrete**. Ottawa, Canada, 1987.
- MALHOTRA, V. M. e MEHTA, P. K. – **Pozolanic and Cementitious Materiald – Adavanced in Concrete Technology** Vol. 1 -, Amsterdam , 1996.
- MALHOTRA, V. M. and RAMEZANIANPOUR, A A. Fly ash in concrete In: MSL Report 94-45 (IR). **Proceedings...** CANMET, 1994, 307 pp.
- MCCARTHY, G. J. et al. Mineralogy of western fly ash. **Proceedings...** Cement and Concrete Research, V. 14, N. 4, 1984, pp. 471-478.
- MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, 1994
- MEHTA, P.K.. **Concrete Admixtures Handbook**. New Jersey, 1984.
- MEHTA, P. K. Natural pozzolans In: **Supplementary Cementing Materials, CANMET Special Publication SP86-8E**, 1987, pp. 1-33. Editor V. M. Malhotra.
- MEHTA, P. K. **Influence of fly ash characteristics on strength of Portland cement –fly ash mixtures** , In: Cemente and Concrete Reaearch, V. 15, 1985, pp. 669-674.
- MENÉNDEZ, G.; BONAVETTI, V. e IRASSAR, E.F. – Ternary blended cement containing limestone filler and slag. In: Sustainable Construction into next millennium: Environmentally friendly and innovative cement based materials. **Proceedings...** João Pessoa , Brazil. 2000, I, 188-199.
- MINDESS, S. – **Mechanical Performace of Cementitius Systems. Structure and Performace of Cementes**. Ed. P. Barnes. Applied Science Publishers, Essex, 1983.
- MOIR, G e KELHAM, S. – Developments in manufacture and use of portland limestone cement. **Proceedings....** Hight-Performace Concrete, ACI SP – 172, Malaysia, 1997, 797-819.

- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. New York: John Wiley and Sons, 1986
- MULLER, F. **HCBLaunches a plant for burning dry sewage sludge**. Holderbank News 1-2, Switzerland, 1995.
- MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregados miúdo para concreto**. Porto Alegre, 2000, 190p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- NANI, L. F. e RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de Experimentos**. Porto Alegre: CPGEC/EFGRS, 1987. 193p. (caderno Técnico, 17)
- NEVILLE, A.M. – **Propriedades do Concreto**. Trad. Savador E. Giamusso. Ed. Pini, São Paulo, 1997.
- NILSSON, K. Padrões de Emissão Para Incineradores de Resíduos. In: Conferência da ISWA - International Solis Wastes and Public Cleasing Association. **Proceedings...** Amsterdam, 1990.
- OLIVEIRA, K. D. e BUCHLER, P. M. – O encapsulamento em cimento como opção para o descarte de rejeitos fenólicos. In : Conferência Internacional sobre Controle e Prevenção da Poluição Industrial. **Anais...** São Paulo, 1993, p. 73-76
- OKUNO, N. et al. – Evaluation of thermal sludge solidification. In: Wat. Sci. Tech. Vol 36, n. 11. , pp 227-233. IAWQ. **Proceedings...** Great Britain, 1997.
- OKUNO, N. e TAKAHASHI, S. - – Full scale application of manufacturing bricks from sewage.. In: Wat. Sci. Tech. Vol 36, n. 11. , pp 243-250. IAWQ **Proceedings...** Great Britain, 1997.
- PADILHA, A F. e AMBRÓSIO FILHO – **Técnicas de análise microestrutural**. São Paulo/SP: HEMUS Editora Ltda. , 1985, 190p.
- PAVAN, L. F. et al. **Resíduos Sólidos Industriais**. CETESB, 1985.
- PARROT, L.J. – The Effect of Moisture Content upon the Elasticity of Hardened Cement Paste. In: **Magazine of Concrete Research**, CCA, vol. 25, 1973.

- PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. – 6ed. Atualizada e revisada por Vladimir Antônio Paulon. Porto Alegre: Globo, 1978
- PINTO, C. S. – **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. São Paulo: Oficina de Texto, 2000, 247p.
- PULKOW, D. e AISSE, M. M. **Estudo da Secagem e disposição do Lodo Anaeróbio obtido em reatores tipo RALF**. Relatório Final. Curitiba, ISAM/PUC. PR Agosto 1996 35 pp.
- REGULAMENTO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO – REFAP Decreto Lei 349-C/83 de 30 de julho de 1983, Lisboa, 1985, 214 pp.
- RILEM – **Recommendations CPC-18. Measurement of Hardened Concrete Carbonatation Depth**. *Matériaux et Constructions*, RILEM, Vol. 21, NOV/DEC. 1988, p 453-455.
- SÁNCHEZ, E. – **Nova Normalização Brasileira para o Concreto Estrutural**. Editora Interciência, Juiz de Fora, 1999.
- SAITO, L.M. **Incorporação de resíduo em tijolos de cerâmica**. Revista Ambiente, vol.8, São Paulo, 1994.
- SALLES, F. M. et al. Crushed Powder Filler – The Use on RCC and the Reduction of the Expansion due to the Alkalies – Aggregate Reaction. In: International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. **Proceedings...** Spain, October, 1995
- SANTOS, H. **São Paulo searches for sludge solution**. Water Quality International, London, 1992.
- SARDINHA, V. L, A. e MORINGO, E - **Lodo de esgoto, características técnicas e de utilização**. SABESP, São Paulo, 1992.
- SATO, k.; SONE, Y.; ISHIKAWA, O.; OGAWA, S.; IRYAMA, M.; ASADA, S.; KOJIMA, H. – **Recycling and reuse of sludge**, Toquio, 1996.
- SERSALE, K. – Advances in Portland and blended cement cement. In: 9th International Congress of the Chemistry of Cement. **Proceedings...** New Delhi, India. 1992, I, 277-279.

- SIMONDI, S. et al. **Propriedades e aplicações do agregado leve de lodo de esgoto.** Revista DAE p291-298. São Paulo, 1989.
- SOROKA, I e STERN, N. – The effect of fillers on strength of cement mortars, In: **Cement Concrete Research**, 1977, 7 (4) 449-456.
- SPERLING, M. V. **Critérios e dados para uma seleção preliminar de sistemas de tratamento de esgotos.**In: Revista BIO. p7-21. São Paulo, 1999.
- SWAMY, R.N. **High Strength Concrete , Material Proprieties and Structural Behaviour**, London, 1985.
- SWAMY, R. N. et al. . **Cement Replacement Materials**. Surrey University Press. London, 1986.
- SEWERAGE DIVISION **Sewerage Systelms in Osaka Prefecture, Japan. Departament of Public Works.** – Osaka , 1998.
- TADAO, K. ; MASSA\_AKI, O e SHUNSOKU, K. – The use of Fine Grain Powder Made from Sewage Sludge as a Mortar and Concrete Admixture. In: 71<sup>st</sup> Annual Conference e Exposition of Water Environment Federation. **Proceedings...** Orlando, USA, October 3-7,1998.
- TAY, J. **Bricks Manufactured from Sludge.** Jounal of Environmental Engineering, Vol 113, N.2, april 1987.
- TAY, J.H. e SHOW, K.Y. Properties of cement made from sludge. **Journal of Environmental Engineering**, vol. 117, N.2, March/April, 1991.
- TAY, J.H.- Sludge Ash as Filler for Portland Cement Concrete. **Journal of Environmental Engineering,**, 1987.
- TAY, J.H. e SHOW, K.Y – Resouse recovery of sludge as a building and construction material – A future trend in the sludge management.. In: Wat. Sci. Tech. Vol 36, n. 11. , pp 259-266. IAWQ. **Proceedings...** Great Britain, 1997.
- TANABE, D. Permeable Formwork. In: Seminar onAdvanced Technology of Construction. **Proceedings...**Mai. 1994. TOKYO.

- THOMPSON, - The Fifth Report of the Royal Commission on Sewagw Disposal. **Journal of the Society of Chemical Industry**, Vol. 28, 1909.
- TRAUNER, E. J. – **Sludge ash bricks fired to above and below ash vitrifying temperature**. J. Env. Eng. ASCE, 119, p 506-519 , 1991
- VÉNUAT, M. E ALAXANDRE, J. **De La Carbonatção Du Beton**. França, CERILM, n.195, 1969, 30p.
- WAGNER, A. A. The Use of the Unified Soil Classification System by the Bureau of Reclamation. In: 4<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering . **Proceedings...** London Vol. 1, p. 125, 1957.
- WALDEMAR, C.C. **Avaliação do potencial de utilização do lodo das estações de tratamento de esgotos** - Relatório 1. DMAE, PMPA, 1992.
- WENG, C.H. e HUANG, C.P. Treatment of metal industrial wastewater by fly ash and cement fixation. Journal of **Environmental Engineering**, vol.120, N. 6, November/December, 1994.
- WATER RESEARCH CENTRE. **The Agricultural Value of Sewage Sludge**. WEF Residuals Management Committee, Biosolids and The 503 Standards, WET. 5, 57 - 62
- WATER QUALITY INTERNATIONAL. Europe's moutainous problem. Number 3 p.22, London , 1992.
- WATANABE, H. e NOZAKI, S. **Characteristics of heavy metal release from sewage sludge**. JSCE. Proc. Environ. Eng. Res. P 11-18, Tokyo, 1996
- WEBER, M.D. **Land utilization of sewage sludge: a discussion paper**. Toronto: Expert Commities on Soil and Water Management, 1984. 48 p.
- WIEBUSCH, B.; OZAKI, M.; WATANABE, H. e SEYFRIED, C. F. – Assenssment of leaching test on construction material made of incinerator ash (sewage sludge): investigatioos in Japan and Germany. In: Wat. Sci. Tech. Vol 38, N. 7, pp 195-205. Proceedings...Great Britain, 1998 .

WIEBUSCH, B. e SEYFRIED, C. F **Utilization of sewage ashes sludge in the brick and tile industry.** IAWQ/PZITS. Specialised Conference on Sludge Management. Wastewater Sludge- Waste ou Resource? – Czestochowa, 1997.

UNITED STATES ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY EPA. **Process Design Manual For Land Aplication of Municipal Sludge.** Cincinnat, 1983.

UNITED STATE ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY EPA.- **Tests Methods for Evaluating Solid Waste/ Physical and Chemical Methodos.**, 1982

U.S e JAPAN CONFERENCE – **Solid and Liquid waste mangement, disposal and processing technology.** TOKYO, 1973