

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

*ELIVETE CARMEM CLEMENTE PRIM*

**REAPROVEITAMENTO DE LODO TÊXTIL E DA CINZA  
PESADA NA CONSTRUÇÃO CIVIL: ASPECTOS TECNOLÓGICOS E  
AMBIENTAIS**

**Dissertação apresentada à Universidade Federal de  
Santa Catarina, para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Ambiental.**

**Orientador: Prof. Dr. Armando Borges de  
Castilhos Júnior**

Florianópolis, 24 de abril de 1998

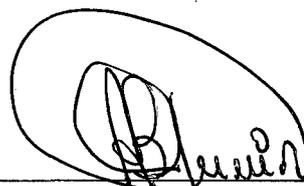
**REAPROVEITAMENTO DE LODO TÊXTIL E CINZA PESADA NA  
CONSTRUÇÃO CIVIL: ASPECTOS TECNOLÓGICOS E AMBIENTAIS**

ELIVETE CARMEM CLEMENTE PRIM

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL**  
na Área de Tecnologias de Saneamento Ambiental.

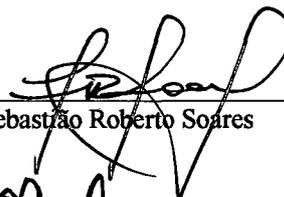
Aprovado por:



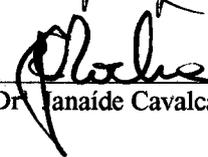
Prof. Dr. Armando Berges de Castilhos Jr.  
(Orientador)



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Malik Cheriaf



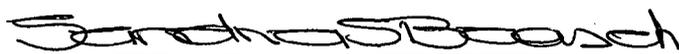
Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Janaide Cavalcante Rocha



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rejane Helena Ribeiro da Costa  
(Coordenadora)



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sandra Sulamita Nahas Baasch

FLORIANÓPOLIS, SC - BRASIL  
ABRIL DE 1998

*Dedico esta dissertação à meus pais Heliete e Manoel, que me deram a vida e toda a liberdade de escolher o meu caminho.*

*A meu Marido Renato, que merece uma página de dedicação especial neste trabalho, por todo apoio, incentivo, carinho e atenção dedicados, em todos momentos.*

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter chegado até aqui e pelas pessoas que ele colocou ao meu redor.

A toda minha família, que é a primeira escola da vida da gente, a base do alicerce para chegar aonde almejamos.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, principalmente:

Ao Professor Dr. Armando Borges de Castilhos Jr. pela orientação fornecida e principalmente pelo esforço em não deixar que faltasse nada para a realização dos ensaios.

Ao Professor Dr. Malik Cheriaf, pela co-orientação do trabalho, principalmente a parte que referente a Engenharia Civil.

Em especial a grande amiga Ana Pinto Cajazeiras, que nos momentos mais difíceis não saiu do meu lado, dando muito apoio e encorajamento próprios da pessoa otimista e positiva que é.

Ao LIMA – Laboratório Integrado do Meio Ambiente, LARESO- Laboratório de Resíduos Sólidos e NPC- Núcleo de Pesquisa da Construção e ao LABMAT- Laboratório de materiais da Engenharia Civil, pela oportunidade de realização deste trabalho.

A todos funcionários e amigos conquistados nestes laboratórios que direta ou indiretamente me apoiaram. Principalmente, ao Luís e Renato do LABMAT - Do NPC, a bolsista Caroline que me acompanhou em boa parte dos experimentos e organização dos resultados a Professora Janaide - Ao Márcio, Nico, Américo, Carlos e Prof. Maurício do LIMA - Do LARESO – onde passei maior parte do tempo, pelas risadas e desabafos - Professor Roberto, Sinara, Andréia, Jean, David (bolsista que me auxiliou em algumas análises e nunca negou nenhum pedido).

Ao amigo Josué Dal Degan pelo trabalho de diagramação realizado nesta dissertação.

A Coordenadoria de Pós-graduação em Engenharia Ambiental – Maurício, Fabíola e Professora Dra. Rejane Helena Ribeiro da Costa (pessoa muito compreensiva que faz tudo que está ao seu alcance para ajudar os seus alunos).

Ao Conselho Nacional de Pesquisa – CNPq, pela bolsa de estudos fornecida.

A Universidade Federal de Santa Catarina, pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO GERAL</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>4</b>
<b>PROBLEMÁTICA</b>	<b>4</b>
<b>2.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>4</b>
<b>2.2 O RESÍDUO DA INDÚSTRIA TÊXTIL PRODUZIDO EM SANTA CATARINA</b>	<b>4</b>
<b>2.3 O RESÍDUO DA USINA TERMELÉTRICA EM SANTA CATARINA</b>	<b>7</b>
<b>2.4 OBJETIVOS</b>	<b>10</b>
2.4.1 Objetivo geral:	10
2.4.2 Os objetivos específicos são:	10
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>12</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>12</b>
<b>3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS - CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS TÊXTEIS – GERAÇÃO, CARACTERÍSTICAS, CLASSIFICAÇÃO.</b>	<b>15</b>
3.2.1 Geração	15
3.2.2 Caracterização e classificação do lodo da indústria têxtil	19
<b>3.3 TRATAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS</b>	<b>20</b>
3.3.1 Solidificação / Estabilização	21
3.3.2 Técnica baseada em cimento	22
<b>3.4 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO</b>	<b>25</b>
3.4.1 Pesquisas realizadas	25
3.4.1 – Aspectos técnicos	33
3.4.2 Aspectos ambientais	39
3.4.3 A cinza leve usada como adsorvedora de metais no processo de E/S com cimento	42
3.4.4 Cimento portland	44

<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>47</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>47</b>
<b>4.1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>47</b>
<b>4.2 - PROTOCOLO EXPERIMENTAL</b>	<b>50</b>
4.2.1 - 1º ETAPA - Amostragem dos materiais:	50
4.2.2 - 2º ETAPA - Caracterização dos materiais:	51
4.2.3 - 3º ETAPA- Preparação dos corpos de prova de lodo/cimento (CPs de L/C):	53
4.2.4 - 4º ETAPA - Caracterização CPs de L/C:	55
4.2.5 - 5º ETAPA - Preparação de corpos de prova de lodo/cinza/cimento ( CPs de L/CZ/C):	55
4.2.6 - 6º ETAPA – Caracterização dos CPs de L/CZ/C:	56
<b>4.3 – MÉTODOS ANALÍTICOS</b>	<b>57</b>
4.3.1 - Difratometria ao raio X	57
4.3.2 - Análise térmica diferencial - ATD	58
4.3.3 - Microscopia eletrônica de varredura – MEV	58
4.3.4 - Análise granulométrica	59
4.3.5 - Densidade real das partículas	59
4.3.6 - Limite de liquidez	60
4.3.7 Determinação da umidade natural	61
4.3.8 Determinação de sólidos totais, fixos e voláteis	61
4.3.9 - Carbono orgânico total (COT)	63
4.3.10 Cromatografia líquida por troca iônica	64
4.3.11 Ensaio de lixiviação	65
4.3.12 Preparação dos corpos de prova	66
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>73</b>
<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>73</b>
<b>5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS</b>	<b>73</b>
5.1.1 Lodo têxtil	73
5.1.2 Cinza pesada	78
5.1.3 Cimento Portland	82
<b>5.2 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (RC)</b>	<b>84</b>
<b>5.3 ANÁLISE DOS ELEMENTOS QUE SOLUBILIZARAM NA ÁGUA DE CURA</b>	<b>88</b>
5.3.1 Interpretação	89
<b>5.4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO pH x TEMPO NA ÁGUA DE CURA</b>	<b>94</b>
<b>5.5 LIXIVIAÇÃO E COT</b>	<b>96</b>

5.5.1 - Interpretação	97
<b>CAPÍTULO VI</b>	<b>99</b>
CONCLUSÃO	99
6.1- RECOMENDAÇÕES	100
<b>CAPÍTULO VII</b>	<b>102</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Armazenagem do lodo em tonéis e sacos plásticos	6
Figura 2.2	Lodo têxtil depositado no aterro sanitário de Blumenau	7
Figura 3.1	Fluxograma do processamento industrial têxtil e despejos gerados	16
Figura 3.2	Fluxograma etapas dos processos de tratamento de efluentes têxteis processando algodão	17
Figura 4.1	Fluxograma da metodologia	49
Figura 4.2	Ponto de coleta do lodo têxtil	51
Figura 4.3	Corpos de prova imersos na água para cura	54
Figura 4.4	Ensaio do pcnômetro-pesagem final	60
Figura 4.5	Filtragem das amostras para análise no DIONEX	65
Figura 4.6	Moldagem (Flow-Test)	68
Figura 4.7	Determinação do índice de consistência	69
Figura 4.8	Ensaio de resistência à compressão	72
Figura 5.1	ATD do lodo de têxtil	74
Figura 5.2	Análise granulométrica do lodo	76
Figura 5.3	Micrografia MEV do lodo	77
Figura 5.4	Micrografia MEV das partículas pequenas	77
Figura 5.5	Micrografia MEV das partículas	77
Figura 5.6	EDAX das partículas grandes do lodo	78
Figura 5.7	EDAX das partículas pequenas	78
Figura 5.8	DXR das cinzas pesadas	80
Figura 5.9	Micrografia eletrônica a varredura das cinzas pesadas	81
Figura 5.10	Micrografia eletrônica a varredura das cinzas pesadas	81
Figura 5.11	ATD das cinzas pesadas	81
Figura 5.12	Análise granulométrica das cinzas pesadas	82
Figura 5.13	Microscopia MEV do cimento	83
Figura 5.14	Sonda EDAX	84
Figura 5.15	Gráfico da RC/Tempo dos traços L/C	85
Figura 5.16	RC x Tempo dos CPs L/C/C com 30% lodo	87
Figura 5.17	RC x Tempo dos CPs L/C/C com 40% lodo	87
Figura 5.18	Gráfico da razão – $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento K	92

Figura 5.19	Gráfico da razão - $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento Cl	92
Figura 5.20	Gráfico da razão - $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento Na	92
Figura 5.21	Gráfico da razão - $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento Mg	92
Figura 5.22	Gráfico da razão - $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento Ca	92
Figura 5.23	Gráfico da razão - $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento $\text{SO}_4$	93
Figura 5.24	Gráfico da razão - $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento $\text{NH}_4$	94
Figura 5.25	Gráfico do pH x Tempo do traço de L/C	95
Figura 5.26	Gráfico do pH x Tempo dos traços L/C/C com 30% de logo	96
Figura 5.27	Gráfico do pH x Tempo dos traços de L/C/C com 40% de lodo	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Produção de lama têxtil no Estado de Santa Catarina	5
Tabela 2.2	Composição química típica das cinzas de carvão mineral dos elementos maiores	8
Tabela 3.1	Produtos químicos auxiliares e corantes presentes em efluente têxtil de uma indústria catarinense de grande porte	19
Tabela 4.1	Plano de moldagem dos CPs L/C	53
Tabela 4.2	Plano de modagem dos CPs L/C/C	56
Tabela 5.1	Composição química do lodo	73
Tabela 5.2	Características Físico-Química do lodo têxtil	74
Tabela 5.3	Resultados da fluorescência aos Raios X do lodo de têxtil	75
Tabela 5.4	Análise química da cinza pesada da termoelétricade Jorge Lacerda	79
Tabela 5.5	Análise química do cimento	82
Tabela 5.6	Resultados de RC dos CPs de L/C	85
Tabela 5.7	R/C dos CPs de L/C/C com 30% lodo (Mpa)	86
Tabela 5.8	R/C dos CPs de L/C/C com 40% lodo (Mpa)	86
Tabela 5.9	Concentração dos elementos químicos	90
Tabela 5.10	Concentração dos elementos químicos no lixiviado	97
Tabela 5.11	% do COT dissolvido no lixiviado	98

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c: relação água/cimento

ANP: alcalinidade – neutralização – precipitação

ASTM: *American Society for Testing Materials*

ATD: Análise térmica diferencial

CAF: cimento de alto forno

CI: carbono inorgânico

COT: carbono orgânico total

CPC: cimento Portland comum

CPs: corpos de prova

CT: carbono total

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO: Demanda Química de Oxigênio

DRX: Difractometria ao raio – X

ETE'S – Estações de Tratamento de Efluentes da Indústria Têxtil

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LL: limite de liquidez

MEV: Microscópio Eletrônico a Varredura

NBR: Norma Brasileira

POZ: cimento pozolânico

RC: resistência à compressão

S/E: solidificação/estabilização

SVD: sólidos voláteis dissolvidos

# RESUMO

Santa Catarina apresenta um expressivo parque fabril, no qual se destaca o setor têxtil, como o terceiro maior do país. A cidade que mais se destaca é Blumenau, pois é nela que se encontram as mais importantes empresas nacionais do setor. Este tipo de indústria gera ao final do tratamento de seus efluentes um resíduo na forma de lodo, que são depositados em pátios, queimados em fornos de cimentarias ou levados para aterro sanitário. Sua composição é bastante variada, visto que nos processos têxteis e de tratamento de efluentes são usados produtos tais como: soda, polímeros, corantes, sais ácidos, amido, sulfato de alumínio e ferro, cal, etc. A produção no Estado é de aproximadamente 20.000 ton/mês, em Blumenau chegam em média ao aterro sanitário municipal 2,5 ton/mês. O depósito destes resíduos ao meio ambiente torna-se um procedimento problemático, considerando sua composição química e a quantidade produzida mensalmente. Pesquisas realizadas sobre lodos, mostram que ele pode ser usado na fabricação de tijolos e misturados com cimento para produzir argamassa entre outros materiais. Também relatam que a cinza de carvão adsorve metais pesados e podem ser usadas no processo de solidificação de lodos com cimento. Neste trabalho apresenta-se uma pesquisa realizada com o objetivo de valorizar o lodo têxtil como material de construção através de técnicas de solidificação, de um lado com cimento e de outro com cimento e cinza pesada de carvão. Depois de feita a caracterização do resíduo, realizou-se ensaios para avaliar parâmetros mecânicos (resistência a compressão), físico-químicos (difração ao raio-x, análise térmica diferencial, análise química da água de cura ao longo do tempo e do lixiviado, controle do pH ao longo do tempo) e estruturais (determinação da morfologia a partir do microscópio eletrônico a varredura). Obteve-se resistências mecânicas apreciáveis comparadas as exigidas para confecção de bloco vasado de concreto simples para alvenaria estrutural, tijolo maciço cerâmico e argamassas. Observou-se também a absorção de metais nas amostras com cinza pesada. Estes resultados são bastante interessantes do ponto de vista da construção civil e ambiental.

# ABSTRACT

Santa Catarina presents an expressive park fabril, in which stands out the textile section, as the third largest of the country. The city that more highlights it is Blumenau, because it is in her that is met the most important national companies of the section. This industry type generates at the end of the treatment of its efluentes a residue in the mud form, that are deposited in patios, burned in ovens or taken for sanitary embankment. Its composition is quite varied, because in the textile processes and of treatment of efluentes healthy used such products as: soda, polymeric, coloring, acid salts, starch, sulfato of aluminum and iron, whitewash, etc. The production in Santa Catarina is of approximately 20.000 ton/month, and in Blumenau arrives on the average to the embankment sanitary 2,5 ton/month. The deposit of these residues to the environment becomes a problematic procedure, considering its chemical composition and the amount produced monthly. Researches accomplished on muds, show that it can be used in the production of bricks and mixed with cement to produce mortar among other materials. They also tell that the ash of coal absorbs heavy metals and they can be used in the process of solidification of muds with cement. In this work it will be presented a research accomplished with the objective of valuing the textile mud as construction material through solidification techniques, of a side with cement and of another with cement and weighed ash of coal (for the evaluation of the absorption of metals). After having done the characterization of the residue, it took place rehearsals to evaluate mechanical parameters (resistance to compression), physical-chemical (x-ray difration, diferencial thermal analysis, chemical analysis of the cure water along the time and of the leached, control of the pH along the time) and structural (determination of the morphology using scanning electronic microscope). It was obtained appreciable mechanical resistances compared to them demanded for making blocks of concrete for structural construction, ceramic massive brick and mortars. It was also observed the absorption of metals in the samples with heavy ash. These results are quite interesting of the point of view of the civil and environmental construction.

# CAPÍTULO

# 1

## INTRODUÇÃO GERAL

O crescente desenvolvimento industrial observado em algumas regiões do país, aliado a expansão demográfica dele decorrente, tem acarretado um aumento considerável na produção de resíduos sólidos, particularmente ao que se refere aos de origem industrial.

O trato inadequado dos resíduos sólidos industriais contribui de forma marcante para o agravamento dos problemas ambientais, notadamente nos grandes centros urbanos , constituindo tarefa potencialmente poluidora do ar, solo e principalmente águas superficiais e do subsolo.

A disposição de resíduos industriais, em aterros sanitários, a céu aberto ou jogados em lagos, rios e mares fazem com que ocorram não apenas prejuízos ao equilíbrio da natureza como também perdas econômicas pelo não reaproveitamento de materiais perfeitamente passíveis de novas utilizações.

Dessa forma, a possibilidade do reaproveitamento de resíduos sólidos e subprodutos industriais como materiais de construção, vem sendo ultimamente estudada por vários pesquisadores.

De acordo com CINCOTTO (1988), são três as razões que motivaram essa atenção: Primeiro, uma preocupação com o esgotamento de reservas de matéria-prima que, se não para um país na sua totalidade, pelo menos para regiões específicas. Segundo, a preocupação com a preservação do meio ambiente, afetada pelo volume crescente de resíduos sólidos descartados. Terceiro, em países

carentes de matéria prima, a necessidade de compensar o desequilíbrio econômico provocado pelo alto preço do petróleo, reciclando resíduos sólidos.

Nesses últimos quinze anos, alguns trabalhos foram desenvolvidos utilizando diferentes tipos de resíduos e de técnicas para a obtenção de novos materiais de construção. O INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT de São Paulo (1988), fez um estudo sobre o processo de obtenção de tijolo de alvenaria de baixa massa específica aparente a partir de argilas com adição de palha de arroz, milho e bagaço de cana. TAY et al (1989), estudaram a utilização da cinza de lodo doméstico como material de concreto leve. NEGREIROS (1993), pesquisou a fabricação de material cerâmico com argila e cinzas de carvão mineral. E SANTOS (1997), Avaliou a atividade pozolânica da cinza de casca de arroz.

A solidificação/estabilização (S/E) de resíduos com cimento é uma técnica conhecida entre os processos de tratamento de resíduos industriais, que tem sido usado com o objetivo de solidificar e estabilizar constituintes tóxicos ou perigosos de resíduos industriais para sua posterior disposição.

A vantagem desta técnica é que ela apresenta a possibilidade de reaproveitamento do solidificado como material de construção, além das exigências simples de processamento e o uso de equipamentos prontamente disponíveis nas indústrias construtoras. O cuidado que tem que se tomar é sobre a certeza de que os elementos não vão ser lixiviados para o meio ambiente, pois alguns resíduos podem não ter seus constituintes totalmente estabilizados dentro da matriz de cimento.

Algumas variações desta técnica de tratamento foram desenvolvidas no sentido de aprimorá-la com relação a este problema. Alguns processos patenteados, utilizam certos aditivos à mistura para que componentes tóxicos e perigosos não sejam lixiviados. O método Chemifix, por exemplo, usa silicatos solúveis e o Envirotech Corporation, silicato de sódio, (CETESB, 1985).

WENG et al (1994), usou a técnica de S/E para moldar corpos de prova de resíduos industriais contendo metais pesados com cimento e cinza leve de carvão

mineral, e verificou além da capacidade adsorção de metais pela cinza, a possibilidade de reaproveitamento do material obtido na construção.

Entre os vários tipos de resíduos e subprodutos industriais que podem ser reaproveitados como materiais de construção, encontram-se os materiais na forma de lodos e cinzas.

Lodos e cinzas são resíduos indesejados de processos industriais ou de tratamento de efluentes e sua disposição é cara e podem afetar as condições ambientais.

Estudou-se neste trabalho, a aplicação da técnica de solidificação/estabilização, misturando-se o lodo da indústria têxtil com cimento e cinza pesada de termelétrica, com o objetivo de pesquisar o desenvolvimento de um novo material de construção considerando os aspectos técnicos e ambientais.

A seguir será apresentado a problemática que envolve estes resíduos em Santa Catarina e assim, sua real importância como materiais de pesquisa.

# CAPÍTULO

# 2

## **PROBLEMÁTICA**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

O lodo produzido nas indústrias têxteis catarinenses, vem se traduzindo num problema crescente, devido principalmente ao destino inadequado e a quantidade produzida diariamente. Para aplicá-lo a técnica de S/E objetivando o seu reaproveitamento na construção civil temos que garantir ao produto obtido condições técnicas e ambientais de uso. Em vista disso e baseados na pesquisa de WENG (1994), que constatou que a cinza leve tem a propriedade de adsorver metais pesados, será utilizada também nesta pesquisa, com o mesmo propósito, a cinza pesada de termelétrica. Optou-se em usar a cinza pesada ao invés da cinza leve pois, além de possuírem composição química semelhantes, como veremos adiante - tabela 2.1, este resíduo é um dos problemas ambientais atuais nas usinas termelétricas.

### **2.2 O RESÍDUO DA INDÚSTRIA TÊXTIL PRODUZIDO EM SANTA CATARINA**

O estado de Santa Catarina apresenta um expressivo parque fabril, no qual se destaca o setor têxtil como o terceiro maior do país. As indústrias têxteis e de vestuário, calçados e artefatos de tecidos estão concentradas principalmente na região do Vale do Itajaí e respondem por 25% do valor da transformação industrial catarinense (FIESC, 1996). Entre as cidades que se encontram nesta região, Blumenau é a que mais se destaca, pois é nela que se encontram as mais importantes empresas nacionais do setor.

No levantamento realizado em visita à algumas indústrias têxteis de Blumenau, (maio de 1996), relacionado com dados econômico-estatísticos publicados pela FIESC (1996), constatou-se que a produção da lama têxtil no Estado é de aproximadamente 20.000 ton/mês. Os dados levantados são apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2-1 - Produção de lodo têxtil no estado de Santa Catarina.

Porte da indústria	Produção de lodo (ton/mês) por porte	Total de indústrias têxteis por porte	Total produção lodo (ton/mês)
Grande	330	24	8.010
Médio	150	49	6.900
Pequeno	33,3	109	3.633
Total geral			19.543

Fonte: PRIM (1996)

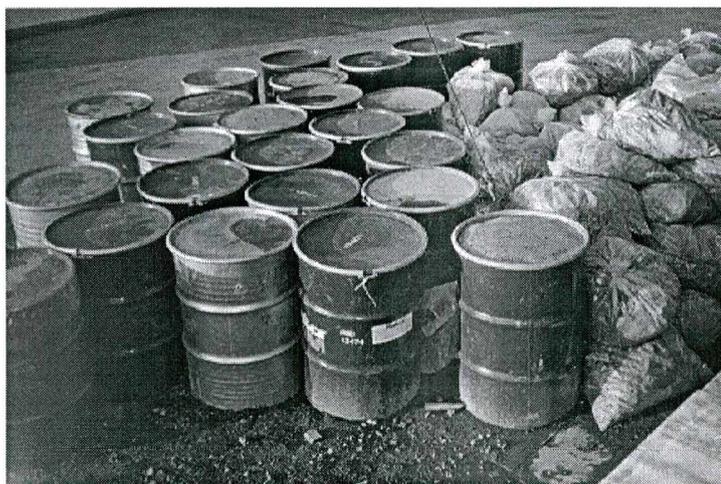
Na indústria têxtil os resíduos sólidos são provenientes dos restos de algodão em fardos, das aparas de tecido na confecção, dos pigmentos em estado sólido da estamparia, da varredura dos prédios e arredores, do lixo de escritório, e principalmente das lamas geradas nas estações de tratamento de efluentes (ETEs).

O lodo têxtil oriunda da prensagem do material decantado na estação de tratamento de efluentes, é rica em metais pesados e outros componentes tóxicos, uma vez que, nos processos têxteis e no de tratamento de seus efluentes, são usados produtos tais como: soda, polímeros, corantes, sais ácidos, gomas, sulfato de alumínio e de ferro, cal, etc.

Por exemplo, os corantes contêm muitos metais pesados, alguns corantes ao enxofre possuem dicromato de potássio como oxidante, gerando cromo hexavalente no despejo, que é solúvel em água e muito tóxico. Estudos indicam que na lista dos mais poluentes, levando em conta a Demanda Química de Oxigênio (DQO), estão, na ordem do mais poluente ao menos poluente os seguintes corantes: ao enxofre, os reativos e os diretos, que são justamente os mais empregados nas indústrias catarinenses, ( MARTINS, 1997).

MAI (1998) analisou o lodo da indústria têxtil sobre alguns parâmetros físico-químicos e verificou que segundo as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) para classificação de resíduos – NB 10004, os parâmetros estudados indicaram que o lodo têxtil é de classe II – não inerte, logo o seu depósito não pode ocorrer em qualquer local. Algumas prefeituras têm permitido a disposição de resíduos em aterros sanitários ou controlados, cabendo às indústrias o pagamento de taxas extras pelo serviço. O local onde são depositados no aterro, não apresentam infra-estrutura adequada para o tipo de resíduo, como impermeabilização do solo e tratamento dos líquidos.

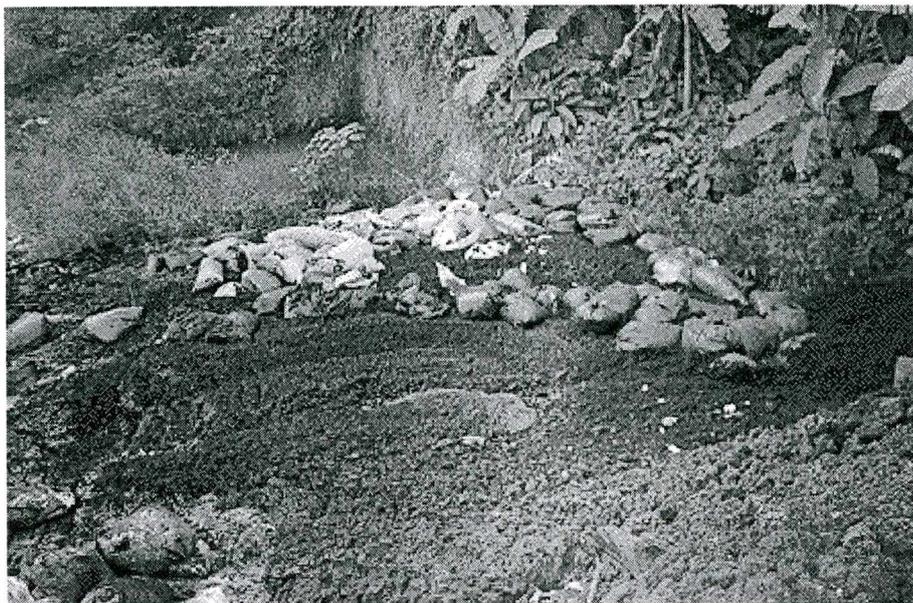
Muitas das indústrias de Blumenau depositam seus resíduos no depósito controlado da cidade, outras armazenam a lama em tonéis ou sacos plásticos e a depositam em pátios a céu aberto, (figura 2.1), existem ainda as indústrias que queimam seus resíduos em fornos de cimenteiras.



Fonte: PRIM (1996)

Figura 2.1 - Armazenagem do lodo em tonéis e sacos plásticos

Chegam ao aterro controlado desta cidade, localizado em área urbana, 2000 a 3000 ton/mês de resíduos têxteis, segundo informações da Prefeitura. O depósito destes resíduos ao meio ambiente sem nenhum tratamento, tornou-se um procedimento problemático, pois além de causar saturamento antecipado do aterro, a lixiviação do mesmo vem poluindo o solo, as águas subterrâneas (figura 2.2), e único rio que abastece a cidade, (MAI,1992).



Fonte: PRIM (1996)

Figura 2.2 - Lodo têxtil depositado no aterro sanitário de Blumenau

Nenhum destes destinos dados ao lodo têxtil é econômico e ambientalmente correto. Dessa forma, se faz necessário o estudo de alternativas para o destino desse resíduo.

### **2.3 O RESÍDUO DA USINA TERMELÉTRICA EM SANTA CATARINA**

O Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado em Tubarão, município do Sul do Estado, produz anualmente cerca de 800 mil toneladas de cinza. Nas termelétricas em geral cerca de 50% em peso do carvão mineral é transformado em cinzas. Estas cinzas se apresentam em dois tipos, as leves e as pesadas. A parcela de cinza pesada e cinza volante gerada dependerá do processo e do equipamento utilizado. No caso de caldeiras de carvão pulverizado, que é o caso da Jorge Lacerda, cerca de 85% das cinzas são volantes e apenas 15% são pesadas. Essas cinzas de carvão mineral são constituídas basicamente de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), que respondem por cerca de 50% e 30% de sua massa, respectivamente conforme tabela 2.2 abaixo.

Tabela 2.2: Composição química típica das cinzas de carvão mineral dos elementos maiores.

Elementos	B	A
SiO <sub>2</sub>	58	55.98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.48	26.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.66	5.8
MnO	0.03	0.02
MgO	0.88	0.59
CaO	1.68	0.25
Na <sub>2</sub> O	0.30	2.59
K <sub>2</sub> O	2.74	1.33
Ti O <sub>2</sub>	1.41	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.28	4.61
P.F	1.15	4.61
CO <sub>2</sub> total	2.3	13.99
C orgânico	0.63	3.79
S total	0.10	0.08
Cl	0	0.02

Fonte: Cheriaf e Rocha (1997)

A: cinza pesada; B : cinza volante

As cinzas volantes são coletadas através de precipitadores eletrostáticos, conduzidas para silos especiais e posteriormente comercializadas. As cinzas pesadas caem no fundo da fornalha e, após resfriamento com água, são transportadas para disposição em bacias de sedimentação.

A necessidade de retirar as cinzas da usina a baixo custo fez com que se adotassem práticas de disposição das cinzas em áreas inadequadas e sem medidas de proteção adequadas

Nas bacias de sedimentação as cinzas pesadas em suspensão decantam com velocidades bastante baixas, acarretando a necessidades de grandes bacias para a obtenção de um efluente clarificado. Além disso, as cinzas pesadas são classificadas como material não-inerte e, apesar das medidas de contenção física das bacias, nenhuma avaliação com respeito a poluição química que as cinzas pesadas podem causar foi realizada, NEGREIROS (1993). Através de chuvas e ventos, estes resíduos podem ser transportados para rios e terras próximos à bacia de sedimentação e acarretar problemas ambientais.

Normalmente, a forma das cinzas é esférica com estrutura vítrea. Devido a sua forma e tamanho, a cinza apresenta uma grande superfície específica. Geralmente a composição da parte esférica é quase imune a dissolução, devido a estrutura vítrea, sendo relativamente inerte, (NEGREIROS , 1993).

No entanto, segundo Gothe<sup>1</sup>, citado por Negreiros (1993), na superfície das partículas esféricas encontram-se moléculas que foram absorvidas durante o resfriamento. Estas moléculas, em presença de água se dissolvem. Este é o mecanismo que produz o lixiviado, que pode conter ainda algumas partículas menores.

Nas bacias de sedimentação, alguns elementos dissolvidos podem ter acesso ao lençol freático, podendo contaminar os lençóis d'água.

Em relação ao pH, as cinzas provocam reação alcalina, fazendo com que este atinja valores acima da faixa ideal (7 a 10).

Devido tanto ao pH de sua drenagem, quanto à solubilização dos elementos presentes na sua composição química, as cinzas são elementos poluidores.

A história dos resíduos das termelétricas tem mostrado a cinza volante como um material perfeitamente reaproveitável, usado em grande parte pela indústria cimenteira por suas propriedades pozolânicas. O problema atual das termelétricas está basicamente relacionado com as cinzas pesadas. A unidade IV do complexo Jorge Lacerda, em recente funcionamento, produz mais cinzas que todas as outras unidades juntas. Como as bacias de sedimentação existentes não comportarão esta produção, haverá necessidade de se encontrar novas áreas para a construção de outras bacias, o que pode causar um problema ambiental.

---

<sup>1</sup> GOTHE C.A. Sistemas de Controle e disposição Final das Cinzas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda - SC e da Usina Termelétrica de Jacuí - RS. Anais do I e II Seminário de Aplicação dos Resíduos da Combustão do Carvão Mineral. Florianópolis, 1989.

Portanto, tendo em vista o potencial poluidor, assim como as dificuldades de encontrar áreas destinadas à disposição final das cinzas pesadas, torna-se evidente a necessidade de se criar uma utilização para este material.

## **2.4 OBJETIVOS**

### **2.4.1 Objetivo geral:**

Este trabalho tem por objetivo geral estudar a solidificação/ estabilização da lama da indústria têxtil, utilizando o cimento e a cinza pesada como aglomerante e absorvedor de metais, respectivamente, avaliando aspectos técnicos e ambientais sobre as possibilidades de reaproveitamento como material de construção.

### **2.4.2 Os objetivos específicos são:**

- ◇ Realizar a caracterização do lodo da indústria têxtil;
- ◇ Moldar corpos de prova e fazer um estudo da solubilização de elementos químicos ao longo do tempo;
- ◇ Acompanhar a avaliação pH da água de solubilização;
- ◇ Verificar a presença de possíveis elementos que retardam a pega do cimento;
- ◇ Analisar a resistência à compressão ao longo do tempo;
- ◇ Verificar a solubilização dos elementos pelo ensaio de lixiviação, conforme a NBR 10005 da ABNT;
- ◇ Avaliar a possibilidade do uso da cinza pesada como material absorvedor de metais no processo de solidificação realizado.

Este trabalho observa a seguinte estrutura:

No capítulo 2, revisão bibliográfica do assunto .

No capítulo 3, descreve-se o programa experimental , com os materiais e métodos utilizados .

Os resultados são apresentado na forma de tabelas, gráficos e figuras no capítulo 4, onde também são analisados e discutidos os resultados.

E finalmente no capítulo 5 são mostradas as principais conclusões e faz-se recomendações para trabalhos futuros.

# CAPÍTULO

# 3

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS - CLASSIFICAÇÃO

A origem dos resíduos sólidos é diversa e resulta das atividades da comunidade como um todo.

É importante distinguir os resíduos sólidos industriais por apresentarem características especiais de acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e disposição final dos demais tipos de resíduos sólidos (urbanos ou daqueles resultantes da varrição, de coleta domiciliar ou de atividades comerciais até determinado volume ou em certas condições).

As decisões técnicas e econômicas tomadas em todas essas etapas do tratamento dos resíduos industriais devem estar inseridas na classificação dos mesmos .

Segundo a ABNT na norma brasileira NBR 10004/87 Resíduos Sólidos – Classificação, resíduos sólidos são todos aqueles “resíduos quer no estado sólido ou semi-sólido que resultam tanto de atividades domésticas como comerciais, de serviços de varrição, agrícola, hospitalar e industrial. Fazem parte também os lodos provenientes de estações de tratamento de água, esgotos domésticos e industriais, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis face a melhor tecnologia disponível”.

A lama gerada nas estações de tratamento de efluentes da indústria têxtil-ETE's, de consistência pastosa, é dessa forma, caracterizada como um resíduo sólido.

Os resíduos industriais, assim como os demais, podem ser classificados conforme seus riscos potenciais e a saúde pública para que se possa determinar um manuseio e destino adequados. Conforme a referida norma, são classificados com base em três grandes categorias :

#### Resíduo Classe I : Perigoso

São aqueles que, conforme é definido na NBR 10004/87, "apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade e, propriedade infecto-contagiosa de característica patogênica, ou ainda conferem periculosidade, podendo apresentar risco a saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento da mortalidade ou incidência de doenças, e/ou riscos ao meio ambiente, quando o resíduo é manuseado de forma inadequada. São exemplos de resíduos classe I : solventes usados, borra ácida de processos de refinados de óleos, resíduos e lodo de tinta de pintura industrial entre outros".

#### Resíduo Classe II : Não Inerte:

"São quaisquer resíduos que não forem caracterizados como perigosos ou como inertes e insolúveis nos termos da norma. Estes podem ter propriedades tais como combustibilidade, bio-degradabilidade ou solubilidade em água".

Este tipo de resíduo poderá ter seus componentes solubilizados além dos limites de potabilidade, quando em contato com água destilada ou deionizada, (Bernardes Jr.,1983). Pode-se citar como exemplos de resíduos classe II : resíduos domésticos, resíduos de gesso, borra e areia de fundição, fios sintéticos, etc.

### Resíduo Classe III - Inerte:

Definem-se como resíduos sólidos inertes e essencialmente insolúveis, quaisquer resíduos sólidos não enquadrados na definição de resíduos perigosos que, quando amostrados de forma representativa e submetidos ao teste de solubilização, segundo NBR 10006 - Solubilização de Resíduos Sólidos –método de ensaio, da ABNT, ou seja, quando submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, á temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor. Como exemplos de classe III podemos citar: tijolos , vidros, certos tipos de plásticos e borrachas que não decompostos prontamente, entre outros.

Quando as características de um resíduo não puderem ser determinadas nos termos da referida NBR, por motivos técnicos ou econômicos, segundo a mesma, a classificação destes resíduos caberá aos órgãos estaduais ou federais de controle da poluição e preservação ambiental.

Para que se possa classificar um resíduo e assim dar-lhe um tratamento adequado é necessário caracterizá-lo.

Para caracterizar um resíduo sólido industrial, o primeiro passo é saber quais são as operações geradoras dos resíduos nas diversas etapas do processamento industrial pois, dessa forma, se poderá coletar informações tais como: produtos usados no processo, quantidades, características físicas, químicas e biológicas, entre outras. Estas auxiliarão na caracterização do resíduo final assim como em sua classificação e escolha do tipo de tratamento .

## **3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS TÊXTEIS – GERAÇÃO, CARACTERÍSTICAS, CLASSIFICAÇÃO.**

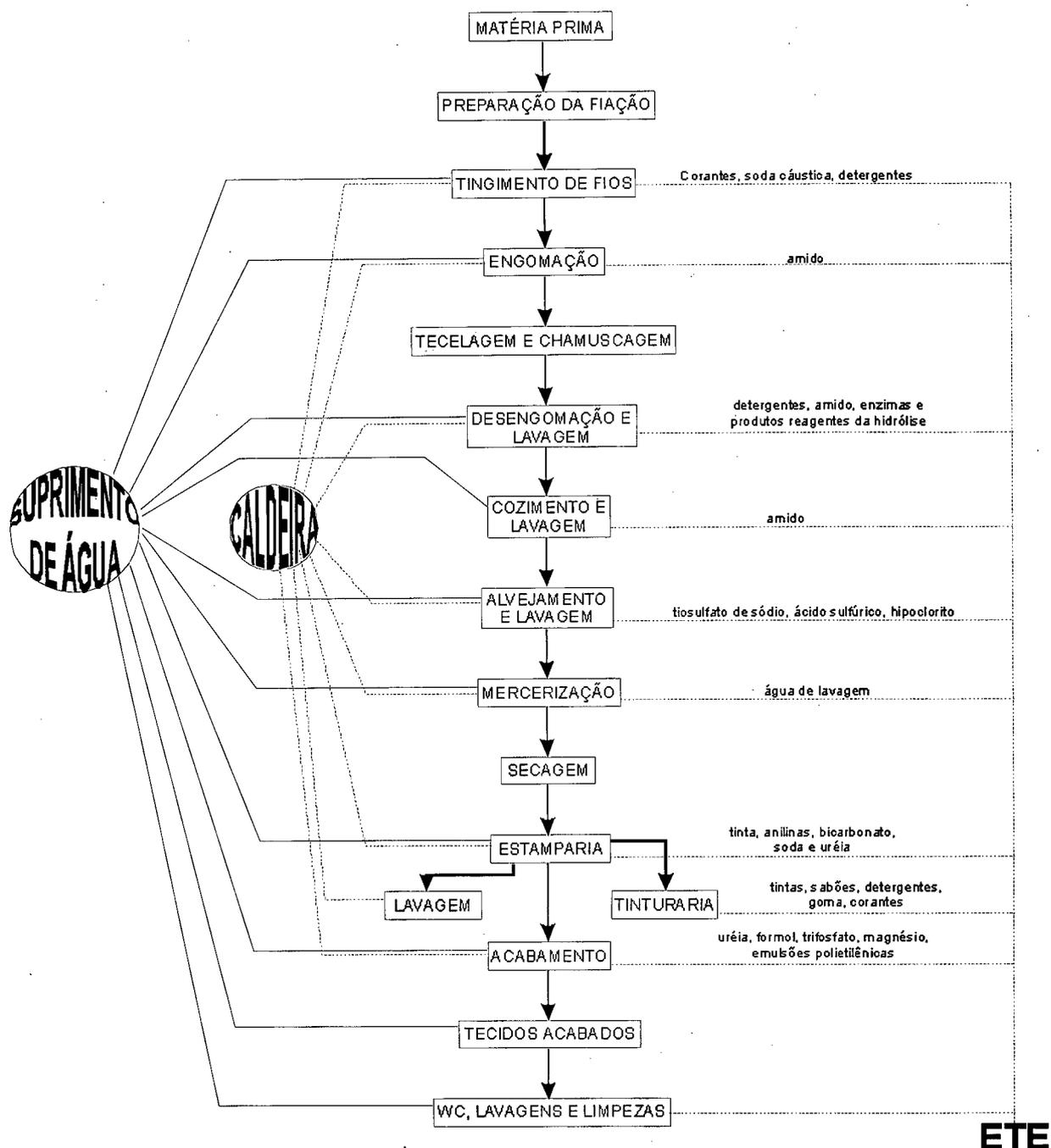
### **3.2.1 Geração**

Segundo CETESB (1993), as indústrias têxteis são agrupadas em três categorias, conforme o tipo de fibra que produz:

- a) fibras naturais: algodão, lã, seda, linho, rami.
- b) fibras artificiais: rayon ( viscose ), acetato.
- c) fibras sintéticas: polyester, nylon, acrílico, lycra.

A geração do lodo da indústria se dá após o processamento das fibras. A transformação da fibra crua em tecido não acabado ou em fios é essencialmente uma operação a seco, com exceção da fase de lavagem da lã crua. As demais operações de acabamento constituem a parte mais importante da indústria, sob o ponto de vista de geração de despejos líquidos, as quais após tratamento vão resultar em água tratada e efluente têxtil (CETESB, 1991).

As etapas do processo fabril e os despejos gerados em cada fase do processo, segundo o beneficiamento das fibras naturais, que é praticamente o mesmo usado para o beneficiamento das demais fibras, é apresentado no fluxograma da figura 3.1.



Fonte: CETESB, 1991

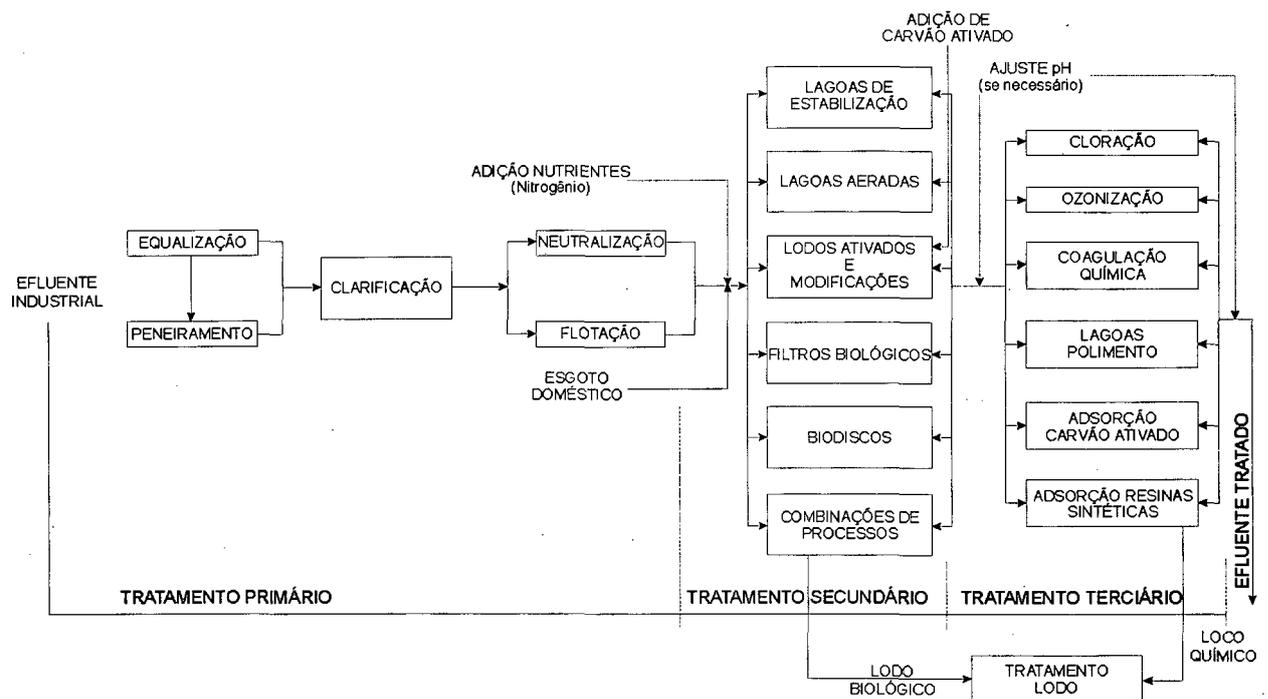
Figura 3.1 - Fluxograma do processamento industrial têxtil e despejos gerados

Como se pode observar, são muitas as etapas gerando despejos durante o processo industrial têxtil. Para se obter tecidos ou peças acabadas, uma indústria têxtil utiliza muita água e vários produtos químicos gerando assim despejos de composição complexa. O destino destes efluentes tem sido geralmente os corpos d'água, só que para isto devem obedecer certos padrões ambientais, necessitando

de tratamento. Este tratamento são realizados em estações de tratamento de efluentes – ETE's localizadas normalmente junto ao parque industrial.

### 3.2.1.1 Tratamento dos efluentes gerados

Nas ETE's os efluentes passam por uma série de tratamentos físicos, biológicos e químicos onde se utiliza em algumas etapas uma grande quantidade de produtos químicos para que o efluente ao final do tratamento obtenha as características determinadas pelos órgãos ambientais para que se possa lançar o efluente tratado em corpos d'água. Na figura 3.2, temos um fluxograma que apresenta as alternativas de tratamento de efluentes da indústria processando algodão :



Fonte: CETESB, 1991

Figura 3.2 - Fluxograma etapas dos processos de tratamento de efluentes têxteis processando algodão

#### ⇒ Tratamento primário :

É realizado para facilitar a remoção da cor e eliminar parte da carga orgânica. Este tipo de tratamento gera uma quantidade significativa de lodo, principalmente por serem adicionados diversos produtos químicos tais como: sulfato de alumínio ou ferroso usados na flotação. Cal, ácido sulfúrico e  $\text{CO}_2$  na correção do pH. Nutrientes

como uréia, ácido fosfórico, monofosfato de amônia, esgoto doméstico (aproximadamente 10% da vazão do efluente) e outros que são adicionados para auxiliar no tratamento biológico

⇒ Tratamento Secundário:

A principal função desse tratamento é a remoção do material orgânico. Os processos biológicos mais empregados são os processos biológicos aeróbios. Nesta etapa não são adicionados produtos químicos. O efluente já foi condicionado para este tratamento na etapa anterior.

⇒ Tratamento Terciário e Avançado

O tratamento é realizado quando há necessidade de remoção de cor e retirada de nutrientes. Os produtos químicos usados podem ser a cal, cloro e sulfato de alumínio ou ferroso. Estas lagoas têm eficiência de remoção de 50% da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), além de sólidos em suspensão, algum nitrogênio e organismos patogênicos.

⇒ Tratamento do lodo

O lodo gerado no sistema biológico precisa ser condicionado adequadamente, para permitir uma correta disposição do mesmo. É recomendável inicialmente, que o lodo retirado do decantador seja conduzido a um adensador, para que possa alcançar um teor de sólidos de 2 a 3%. Após essa etapa o lodo deve ser desaguado em leitos de secagem, filtros-prensa ou belt-press (prensas desaguadoras), nestes dois últimos, que são os mais usados, costuma-se usar polímeros para que o lodo coagule facilitando o trabalho de prensagem.

Após todo tratamento, o efluente tratado de acordo com os padrões ambientais é lançado a um meio receptor. A decisão técnica a ser aplicada para a disposição final deste lodo deverá estar fundamentada dentro da classificação dos mesmos, o que condicionará ou não a necessidade de se adotar um manuseio e técnicas de tratamento adequados a resíduos industriais.

### 3.2.2 Caracterização e classificação do lodo da indústria têxtil

O lodo da indústria têxtil não é um resíduo de simples composição. Ele é formado por toda a parte sólida dos produtos utilizados tanto no processamento industrial como no de tratamento de efluentes, que decantaram após tratamento na forma de sólidos suspensos. Portanto uma pré-caracterização pode ser feita pela relação das características do efluente antes do tratamento, como mostra a tabela 3.1, e dos produtos usados na ETE, mencionados anteriormente.

Tabela 3.1 Produtos químicos, auxiliares e corantes presentes em efluente têxtil de uma indústria catarinense de grande porte

<b>Produto</b>	<b>%</b>	<b>Produto</b>	<b>%</b>
Corantes à Tina	0,5	Corantes Reativos	2,2
Corantes Azóicos	0,4	Corantes Diretos	0,005
Corantes Dispersos	0,005	Corantes Enxofre	0,2
Pigmentos	0,7	Cloreto de Sódio	14,0
Hidróxido de Sódio	12,0	Peróxido de Hidrogênio	7,0
Uréia	3,0	Silicato de Sódio	2,0
Hidrossulfito de Sódio	2,0	Carbonato de Sódio	1,0
Ácido Acético Glacial	1,0	Bicarbonato de Sódio	0,6
Etanol	0,3	Sulfato de Sódio	0,3
Acetado de Sódio	0,3	Acido Muriático	0,3
Nitrito de Sódio	0,06	Sulfato de Magnésio	0,02
Engomantes	14,0	Amaciantes	8,0
Aguarás	1,0	Detergentes	4,0
Pasta de estamperia	3,0	Sequestrante	2,0
Ligante	2,0	Umectante	1,0
Fécula de mandioca	0,7	Fixador de Corante	0,6
Dispersante	0,4	Branco Ótico	0,4
Anti Espumante	0,3	Colóide Protetor	0,3
Igualizante	0,3	Glicerina Branca	0,2
Anti Migrante	0,2	Emulgador	0,2
Lubrificante de Engomagem	0,2	Espessante	0,1
Anti Oxidante	0,07	Emulsionante	0,06
Catalizador	0,04	Anti Redutor	0,04
Espumante	0,02	Carrier	0,0005

Fonte: Martins ( 1997)

Pode-se observar que dos 28 produtos relacionados 6 deles somam 55% da quantidade total dos produtos usados, que são: o hidróxido de sódio – 12%, os engomantes – 14% (normalmente é usado o amido), o cloreto de sódio – 14%, peróxido de hidrogênio – 7% e amaciantes – 8%.

May (1992), que realizou um estudo sobre as características do lodo de uma indústria têxtil de Blumenau e verificou que na sua composição há uma grande quantidade de água (89%) e uma mistura complexa de várias substâncias incluindo, metais, não-metais e compostos orgânicos.

Evidenciou-se a total ausência de elementos potencialmente tóxicos como chumbo, cádmio, arsênio, mercúrio. e uma elevada concentração de ferro (344,17 ppm), alumínio (29.941,67 ppm) e sódio (1500,00 ppm). Justificou-se a elevada concentração de alumínio e sódio pelo fato da empresa que forneceu a amostra usar no processo de tratamento do efluente sulfato de alumínio -  $Al_2(SO_4)_3$  como agente floculador e, hidróxido de sódio - NaOH, como controlador de pH da água do efluente.

O lodo foi classificado segundo alguns critérios analisados, como de classe II - não-inerte e de baixa toxidez. Os parâmetros avaliados seguiram as normas da ABNT -amostragem de resíduos - NBR 10007 e classificação de resíduos - NBR 10004, as análises físicos químicas foram realizadas conforme o Standart Methods (da American Public Health Association), e Office Methods Of Analysis (da Association Of Official Analytical Chemists).

### **3.3 TRATAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

Define-se tratamento de resíduos, segundo a CETESB (1985), como qualquer processo que altere suas características, composição ou propriedades de maneira a tornar mais aceitável sua disposição final. Atualmente são conhecidos mais de trinta processos de tratamento de resíduos industriais que podem ser agrupados em três grandes classes: tratamentos químicos, físicos e biológicos.

Os tipos de tratamento mais freqüentemente utilizados para resíduos sólidos são os seguintes:

- Secagem e desidratação de lodos;
- Incineração;
- Aterros de resíduos;
- Landfarming ( fazendas de lodos );
- Compostagem;
- Solidificação/ estabilização.

### 3.3.1 Solidificação / Estabilização

Solidificação/estabilização são processos de tratamento designados para melhorar as características físicas dos resíduos, diminuir a área da superfície ou limitar a solubilidade dos constituintes perigosos. A solidificação é a parte do processo na qual materiais são adicionados ao resíduo para produzir um sólido. Pode ou não haver um laço entre o contaminante tóxico e o aditivo. A estabilização se refere ao processo pelo qual o detrito é convertido para uma forma mais estável quimicamente. O termo inclui a solidificação, mas também inclui o uso de uma reação química para transformar o componente tóxico em um novo componente ou substância não tóxica. Processos biológicos, entretanto, não são considerados.

Existem vários processos de S/E e todos envolvem reações entre os resíduos e outros compostos introduzidos na massa para promover a precipitação dos íons metálicos, solúveis na forma de hidróxidos insolúveis. Estes compostos podem catalisar as reações de cura que solidificam a matriz e podem aumentar as ligações entre o resíduo e os reagentes.

As propriedades físicas e químicas das matrizes variam de acordo com as características do resíduo, com os tipos de reagente utilizados, e com as condições de umidade e de cura. A maioria dos processos de S/E foram desenvolvidos para tratar resíduos inorgânicos, principalmente aqueles contaminados por metais

dissolvidos. Compostos orgânicos normalmente interferem negativamente na cura da matriz solidificada. No entanto num artigo publicado por Jackman et al (1991) afirmaram que existem processos de fixação química capazes de tratar resíduos com teores de compostos orgânicos superiores a 80%.

Os métodos de S/E se dividem em sete tipos diferentes conforme a CETESB(1985), FREEMAN (1989), OLIVEIRA (1992), HANNA (1990) E CHAMIE (1994), são os seguintes:

- Técnicas baseadas em termoplásticos;
- Técnicas que utilizam polímeros orgânicos;
- Técnicas de auto-solidificação;
- Técnicas de vitrificação;
- Técnica de encapsulamento;
- Técnicas baseadas em materiais pozolânicos e
- Técnica baseada em cimento.

### 3.3.2 Técnica baseada em cimento

Muitos resíduos contaminados podem ser misturados diretamente no cimento, permitindo a incorporação dos contaminantes na matriz solidificada. Este processo é particularmente eficiente para resíduos com altos teores de metais tóxicos, porque o pH da matriz de cimento favorece a formação de cátions em hidróxidos e carbonatos insolúveis, e muitos íons metálicos podem ser incorporados à estrutura cristalina da matriz de cimento (CHAMIE, 1994).

Ressalte-se que a presença de compostos inorgânicos e impurezas orgânicas, no resíduo ou na água utilizada na confecção da matriz, podem interferir negativamente nas reações de cura e nas características mecânicas da matriz de cimento.

Existem aditivos desenvolvidos especialmente para melhorar as características físicas e diminuir a lixiviabilidade de matrizes de cimento-resíduo. Muitos são marcas registradas de empresas que dedicam-se ao setor (estes serão apresentados adiante como processos específicos), HANNA(1990).

A técnica baseada em cimento apresenta segundo FREEMAN (1998), vantagens e desvantagens.

Vantagens:

- ⇒ Tecnologia do manuseio e mistura de cimento bem conhecida e utilização de equipamentos comuns;
- ⇒ Processo ocorre a temperatura ambiente não necessitando de energia auxiliar;
- ⇒ Desnecessidade de secagem do resíduo;
- ⇒ Sistemas tolerantes a variações químicas e resíduos, necessitando de pré-tratamento somente se contiverem componentes que retardem as reações do cimento;
- ⇒ Características de lixiviação do produto final , se necessário, podem ser melhoradas através de revestimentos com selante ou adição à mistura de aditivos;
- ⇒ Possibilidade de variação da quantidade de cimento usado para produzir produtos com alta capacidade suporte, bons materiais de fundação com sub-base e de baixa permeabilidade;
- ⇒ Dependendo de suas características do ponto de vista da engenharia civil e ambiental pode ser reaproveitado como material de construção.

Desvantagens:

- ⇒ Necessidade de grandes quantidades de cimento;
- ⇒ Produtos finais que não passaram no teste de lixiviação não poderão ser usados como materiais de construção;
- ⇒ Resíduos contendo grande quantidade de impurezas afetam o endurecimento e a cura da mistura resíduo/cimento necessitando de um pré-tratamento ou da utilização de cimentos especiais de custo mais elevados ou aditivos.

Segundo FREEMAN (1989), "nas reações de cimento Portland com um material pozolânico, o cimento portland é combinado com cinza leve ou outras pozolanas para produzir uma resistência relativamente alta da matriz resíduo-concreto. Sílica solúvel deve ser adicionada para ajudar no processo e auxiliar na formação de sílica gel. A água é removida na hidratação do cimento portland. Em variações desta

tecnologia, o cimento de alumínio pode ser usado com ou no lugar do cimento portland”.

As características deste processo são:

- ⇒ os produtos pozolânicos adicionados ao cimento portland reagem com o hidróxido de cálcio para aumentar a força e a resistência química dos produtos solidificados;
- ⇒ vários tipos de cimento portland estão disponíveis e podem ser selecionados para acentuar uma reação específica desejada. O cimento portland tipo I tem sido mais largamente usado;
- ⇒ uma variedade de materiais, (por exemplo sílica solúvel, sílica gel hidratada, argila), tem sido adicionados para aumentar ou mudar uma performance desejada. Muitos aditivos são considerados adequados por produtores. Alguns dos aditivos mais comuns são:
  - ⇒ Silicatos sólidos, como silicato de sódio e silicato de potássio. Estes agentes são úteis na redução da interferência de íons metálicos de resíduos em soluções;
  - ⇒ Argilas selecionadas absorvem líquidos, cátions e ânions específicos;
  - ⇒ Emulsificadores permitem a incorporação de líquidos orgânicos. Pesquisas no campo dos resíduos nucleares tem indicado que os resíduos de óleo e graxas podem ser misturados ao cimento se agentes dispersantes e sistemas adequados de mistura forem usados;
  - ⇒ Absorventes que unem seletivamente resíduos específicos. Estes materiais incluem carbono, silicatos, materiais zeolíticos e celulose; eles se agarram aos constituintes tóxicos e são encapsulados pelos resíduos;
  - ⇒ O cal pode ser usado para aumentar o pH e a temperatura de reação para melhorar o ajuste das características.
- ⇒ certos componentes dos resíduos podem interferir na estabilidade dos processos baseados em cimento. Isto inclui materiais como boratos, sulfato de cálcio, fenol,

óleo e graxas. Ácidos podem reagir com o concreto e destruir a matriz, causando a liberação de poluentes no ambiente.

### **3.4 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**

#### **3.4.1 Pesquisas realizadas**

Recentemente, vários estudos vem sendo publicados sobre a possibilidade do uso de resíduos para obtenção de novos materiais de construção, muitos inclusive, usando a técnica de S/E baseada em cimento. Há também muitas publicações referentes ao uso desta técnica para tratamento de resíduos industriais, que apesar de não enfocarem especificamente a possibilidade de reaproveitamento como material de construção, são sempre realizados testes como, resistência a compressão (RC) e lixiviação, entre outros, tendo-se assim, condições de se fazer uma avaliação sobre este ponto de vista.

TAY (1989), verificou que o lodo do tratamento de efluente doméstico misturado com argila pode ser usado na produção de tijolos. Os resultados indicam que aproximadamente 40% do peso do lodo seco pode ser misturado com argila para fazer tijolos. Cinza de lodo doméstico incinerado também foi utilizado na fabricação de tijolo por TAY (1987a), e um bom resultado foi obtido usando 50% de lodo na mistura. Cinza pulverizada também pode ser usada misturada ao cimento para produzir concreto ( TAY, 1987b ), e usada como filler para cimento portland em concreto (TAY, 1987c). Uma melhora na trabalhabilidade do concreto fresco foi relatada quando a porcentagem do cimento substituída por cinza de lodo foi aumentada. Efeitos de segregação, tempo de cura, retração e absorção da água no concreto não foram significativos. A resistência a compressão diminui a medida que a proporção cinza de lodo foi aumentada. Com cerca de 10% de cimento substituído por cinza de lodo, a resistência se desenvolveu dentro dos padrões .TAY(1991), também pesquisou uma mistura de lodo com cal para produzir cimento. Lodo de esgoto desidratado foi misturado com diferentes proporções de cal. Estas misturas foram pulverizadas e queimados sob temperatura controlada de 1000<sup>0</sup>C por 4 horas. A cinza obtida da queima apresenta uma finura de 80μ. . Sob cura ao ar livre e as

condições citadas acima, um corpo de prova na proporção de 1:1, exibiu aos 7 e 28 dias RC de 5,92 MPa e 6,28 Mpa respectivamente. O cimento de lodo/cal alcançou resistência de controle em todas as idades, enfim foi concluído que o material obtido pode ser usado para trabalhos gerais em argamassas, entretanto efeitos de alta demanda de água e rápida pega devem ser estudados.

CHAMIE (1994), fez um estudo sobre o encapsulamento de resíduos de lamas galvânicas através da solidificação em matrizes de cimento. O estudo foi realizado sobre lamas galvânicas de duas empresas diferentes. A lama da empresa Adiboard é basicamente formada por trióxido de cromo. E a outra, da Deca metais, compõe-se basicamente de metais como o Br, Zn, Ni, Cd, Fe, Pb.

O objetivo foi reenquadrar os resíduos em uma classe menos agressiva ao meio ambiente, já que são classificados como perigosos. Determinar o motivo deste novo enquadramento se físico ou químico, e quais as possíveis utilizações do material encapsulado. Para tanto, foram ensaiados corpos de prova de cimento/resíduo nos traços 4:1, 5:1, 6:1, 7:1, 8:1 com o resíduo da Adiboard e 6:1 da Deca, e as matrizes cimentícias submetidas a ensaios de lixiviação, solubilização, resistência mecânica à compressão, porosimetria ao N<sub>2</sub> e difratometria de raio-x, e os resíduos brutos submetidos a ensaios de lixiviação, solubilização e difratometria de raio-x. A opção do uso da técnica foi baseada na afinidade eletiva dos materiais, pois, tanto o resíduo quanto o cimento apresentam caráter alcalino.

Os resultados de todos os ensaios de lixiviação e solubilização realizados, os quais apresentaram teores de metais no extrato lixiviado e solubilizado inferiores aos padrões estabelecidos pela NBR 10.005 – Lixiviação de resíduos e NBR 10.006 – Solubilização de resíduos, permitiram afirmar que a tecnologia de encapsulamento destes resíduos em matrizes de cimento é eficiente na sua reclassificação, segundo a NBR 10.004 – Resíduos Sólidos - Classificação.

Os ensaios de resistência mecânica apresentaram valores muito dispersos, com tendência de elevação ao longo do tempo, exceto para os corpos-de-prova confeccionados com resíduo do Adiboard, que apresentaram alta resistência inicial seguida de suave declínio ao longo do tempo. Os corpos-de-prova confeccionados

com resíduo da Deca Metais segundo CHAMIE (1994), apresentaram baixa resistência inicial e sofreram forte declínio ao longo do tempo. (resultados-anexo 1a).

CHAMIE (1994), recomendou que o preparo da argamassa seja executado na seqüência inversa à proposta pela NBR-7215, Cimento Portland- Determinação de resistência à compressão, utilizada no trabalho, pois a introdução inicial do resíduo, seguida da introdução da água e do cimento, permitiria a sua melhor desagregação e uma maior homogeneização da argamassa, causando menor interferências na resistência mecânica.

Os ensaios de solubilização e lixiviação também foram prejudicados pelo baixo grau de homogeneização proporcionado pelo equipamento de mistura utilizado, o que foi constatado em inspeção visual dos corpos-de-prova ensaiados, na superfície dos quais pode-se encontrar grãos de resíduo bruto.

Os resultados dos ensaios de porosidade ao Hg e ao N<sub>2</sub> e de granulometria permitiram afirmar que a matriz de cimento retém fisicamente os grãos de resíduo, já que estes têm diâmetro esférico equivalente compreendido entre 0,5 micra e 20 micra, e diâmetro esférico equivalente médio de 5 micra, enquanto o diâmetro médio dos poros da matriz cimento/resíduo determinado no porosímetro de mercúrio varia de 0,054 micra a 8,75 micra e no porosímetro de N<sub>2</sub> varia de 0,009 micra a 0,023 micra.

A difractometria de Raios-X detectou todos os compostos presentes na matriz cimento/resíduo, onde apareceram alguns dos metais provenientes dos resíduos (Pb, Cd, Cr, Zn, Ni e Fe), demonstrando que tais espécies químicas encontram-se retidas, no retículo cristalino da referida matriz.

CHAMIE (1994), concluiu também que, os metais retidos encontram-se normalmente oxidados à valência mais estável e ressalta que, ter um metal retido em estado de oxidação não preferencial, não significa que este irá reduzir-se facilmente ou, mesmo, abandonar o retículo de alguma outra forma.

KORCHI<sup>2</sup>, citado por CHAMIE (1994), estudou o comportamento da microestrutura e da capacidade de estabilização de uma matriz de cimento portland comum acrescida de um resíduo galvânico produzido em laboratório, composto basicamente, de metais pesados e solventes orgânicos. O efeito da microestrutura foi avaliado com o auxílio de um microscópio eletrônico e de um difratômetro de raios-x, e a capacidade de estabilização pelo ensaio de lixiviação.

O autor concluiu que a presença de solventes orgânicos interfere na estabilidade da matriz porque dificulta a hidratação da massa, podendo causar alterações nas suas propriedades físico-químicas, interferindo conseqüentemente, nos mecanismos de estabilização dos metais. Compostos orgânicos também influenciam na cura da massa. Os dois principais mecanismos intervenientes são a adsorção de moléculas orgânicas por partículas constituintes de estrutura cristalina, bloqueando as reações de hidratação, e a complexação destes compostos entre si, e com os íons de cálcio, alumínio e ferro, mantendo-os em solução, impedindo a formação dos compostos hidratados formadores de estrutura cristalina. O ataque químico sofrido por uma matriz de cimento é preliminarmente dependente das concentrações de cloretos, sulfatos e da relação resíduo/cimento.

Os íons cloreto dissolvem o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) que é abundante na matriz, aumentando a porosidade da massa. Os íons cloreto podem combinar-se com alumínio, dissolvido ou complexado, formando monocloroaluminato de cálcio hidratado. As hidroxilas, também provenientes da dissolução do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , combinam-se com o magnésio, na presença de água do mar, formando hidróxido de magnésio (brucita), de acordo com a equação a seguir:



O hidróxido de magnésio é muito menos solúvel que o hidróxido de cálcio, enquanto a precipitação da brucita nos poros da matriz reduz a permeabilidade da massa, reduzindo, por conseguinte, a penetração de cloretos. O depósito de

---

<sup>2</sup> KORCHI, T.EL & MELCHINGER, K. & GRESS, D., The effect of chloride, sulfate and seawater solutions on the expansion and cracking of portland cement stabilized cadmiun hazardous waste. United States of America, International Conference Cement Microscopy, 1987.

aragonita, um cristal de carbonato de cálcio, sobre a camada de brucita, cria uma estrutura interna de proteção .

A presença do ânion sulfato pode causar uma expansão da massa devido a uma estrutura cristalina de etringita, que é formada quando o sulfato combina com o aluminato de cálcio hidratado ou anidro. O fissuramento da matriz pode ocorrer se houver formação excessiva de etringita. Assim como ocorre com o ânion cloreto, a propagação do ânion sulfato na matriz é limitada pela formação de brucita, conforme apresentado na equação a seguir:



O decréscimo da permeabilidade causada pelo depósito de cristais nos poros pode inibir a formação de etringita, pois limita o acesso dos ânions sulfato. O ânion cloreto pode substituir o ânion sulfato na formação da etringita, assim como a sílica e o alumínio.

A etringita é instável em meios com pH inferior a 10, o que implica que a sua formação na presença de água do mar, pH = 8,4, pode ser mínima.

HANNA(1990) realizou um trabalho em escala de laboratório sobre a fixação de metais pesados em matriz de cimento tendo em vista a disposição final de rejeitos industriais perigosos.

O processo de encapsulamento foi testado para rejeitos perigosos originados na produção industrial de fungicidas para uso em tintas. Esses rejeitos são compostos organo-arseniais e organo-mercuriais. E ainda utilizou um argilomineral uma bentonita organofílica, elevada capacidade de troca de cátions, a qual é conveniente no tratamento devido a propriedade de interação com os compostos orgânicos.

Os testes de lixiviação por 24 horas em solução de ácido acético mantida em pH 5 mostraram que:

- ⇒ na matriz de cimento o arsênio lixiviado ficou abaixo do padrão brasileiro de 5 ppm;
- ⇒ Quando foi misturada bentonita organofílica as concentrações de arsênio no lixiviado foram ainda mais baixas;
- ⇒ A concentração de mercúrio no lixiviado esteve sempre acima da norma brasileira, 0,1 mg/l, mesmo quando foram utilizadas argilas organofílicas. Um duplo encapsulamento trouxe a concentração do lixiviado para dentro dos padrões brasileiros.

O ensaio de Resistência a compressão foi realizados sobre corpos-de-prova com traço 1:8:1, resíduo/cimento/argila, os resultados obtidos estão apresentados na tabela 3.2 .

Tabela 3.2 - Resistência à compressão dos resíduos encapsulados

Corpo de prova	Composição	Resistência à compressão (MPa) 28 dias	Resistência à compressão (MPa) 90 dias
- Cimento e água	0 x	42,5	55,3
	0 y	55,0	70,4
- Resíduo As, cimento, argila	1x	10,0	12,3
	1y	9,8	15,7
- Resíduo Hg, cimento, argila	8x	14,9	19,9
	8y	14,9	22,0

Fonte: Hanna (1990)

Ficou evidenciado , conforme HANNA que a adição da argila organofílica e dos resíduos interferiram nas reações de hidratação e endurecimento do cimento. A influência mais branda do resíduo organo-mercurial observada nas duas idades (28 e 90 dias) pode servir para confirmar que o Hg interfere pouco nos processos de hidratação do cimento.

O aumento da resistência mecânica das matrizes com o decorrer do tempo permitiu levantar a hipótese de que, em idades posteriores, poderá deixar de ser sentida a ação diminuidora do endurecimento exercida inicialmente pelos componentes dos resíduos.

Finalmente, a autora comparou seus resultados com de outros autores e concluiu que os resíduos organo-arseniais e organo-mercuriais apresentam níveis aceitáveis de resistência à compressão quando encapsulados em matrizes de cimento.

⇒ CLÁUDIO (1987) desenvolveu experimentos de solidificação utilizando lamas originadas de tratamentos de efluentes galvânicos e diversos tipos de cimento de fabricação nacional, procurando analisar a adequação destes materiais às técnicas de solidificação de lamas com metais pesados e outros compostos tóxicos. Os experimentos executados seguiram o roteiro abaixo:

- ⇒ Secagem complementar da lama no laboratório;
- ⇒ Preparo das formas para moldagem dos corpos de prova;
- ⇒ Preparo das misturas;
- ⇒ Determinação das consistências das misturas;
- ⇒ Moldagem dos corpos de prova;
- ⇒ Cura dos corpos de prova;
- ⇒ Ensaio de resistência mecânica das misturas solidificadas;
- ⇒ Ensaio de lixiviação das misturas solidificadas;
- ⇒ Ensaio de solubilização das misturas solidificadas.

Foram utilizados na confecção dos corpos de prova cimento “portland” comum (CPC), cimento de alto forno (CAF) e cimento pozolânico (POZ), que representam mais de 99% da produção total de cimento no país. Os resultados obtidos foram os seguintes:

- A principal conclusão que se pode tirar dos resultados dos ensaios de resistência à compressão é que os componentes da lama, indiscutivelmente, interferem nas reações de hidratação do cimento, retardando o endurecimento da mistura. Os resultados obtidos permitiram supor que o zinco age como um poderoso retardador da resistência mecânica das misturas. Essa hipótese foi baseada nos estudos de outros pesquisadores. As misturas de CAF tiveram comportamento

semelhante às de CPC, embora com resultados um pouco inferiores. Dentre os 3 cimentos, o CAF foi o que demonstrou os piores desempenhos com relação à resistência mecânica. Na idade de 90 dias, as misturas de relação água cimento (a/c) 0,3 para os 3 cimentos, apresentaram resistências superiores a 15,0 Mpa..

- Em todas as matrizes ensaiadas, as concentrações de metais no lixiviado estiveram bem abaixo dos limites das normas da ABNT, indicando tratar-se de material não perigoso. As eficiências de retenção dos metais estiveram, em todas as matrizes ensaiadas, sempre acima de 96% na maioria dos casos, superando 99%. Dentre todos os íons analisados, o bário foi o que apresentou menor capacidade de fixação nas matrizes solidificadas. Os ensaios de lixiviação demonstraram, no entanto, ser a solidificação com cimento uma técnica altamente eficiente na estabilização de lamas tóxicas contaminadas com metais pesados. Dentre os 3 cimentos pesquisados, o CAF, em média, foi o que demonstrou o menor desempenho na fixação dos metais.
- Os resultados dos ensaios de solubilização indicaram que, em linhas gerais, as misturas executadas com 3 tipos de cimentos comportam-se de forma semelhante quando submetidos ao contato da água em pH neutro. Os metais de maior toxicidade presentes na lama bruta, com cádmio, chumbo, mercúrio e estanho não foram detectados em nenhum extrato das amostras ensaiadas. Os metais presentes em maior porcentagem na lama bruta como cobre, níquel e zinco, foram detectados em concentrações ínfimas nos extratos, em valores de que permitiram classificar as matrizes como materiais inertes - classe 3, segundo a ABNT. O único metal que foi detectado em todos os extratos em concentrações muito superiores as recomendadas na norma referida é o alumínio. A única explicação que se encontra para este fato, é que nas condições de pH do ensaio de solubilização (neutro), o alumínio se mostra mais solúvel que nas condições do ensaio de lixiviação (pH 5.0).

Algumas indústrias têxteis catarinenses fizeram alguns ensaios tentando reutilizar o lodo, para fabricação de lajotas e tijolos, mas nada foi comprovado cientificamente. As lajotas obtidas da mistura com cimento suportaram até 60 toneladas. O custo de fabricação foi 30% menor que o custo das lajotas

convencionais. Tijolos foram moldados com diferentes proporções de lodo/argila, porém, não foram feitos os ensaios de ruptura. O que se observou foram fissuras e esfarelamento nos tijolos que receberam maior parte de lodo.

### 3.4.1 – Aspectos técnicos

Aspectos técnicos devem ser considerados no que diz respeito ao reaproveitamento como material de construção, de resíduos S/E pela técnica de cimento. Como se sabe, a qualidade de materiais a base de cimento depende fundamentalmente da qualidade da pasta que, por sua vez, depende da relação água cimento, do tipo de cimento utilizado na mistura e da execução da cura. As reações de hidratação, responsáveis pelo endurecimento, exigem tempo e condições favoráveis de umidade e temperatura. Elas ocorrem rapidamente a princípio e, depois, cada vez mais lentamente, sob condições favoráveis.

Para a obtenção de um produto de boa qualidade, é necessário que todos os grãos do material inerte, desde os menores até os mais graúdos, sejam completamente envolvidos pela pasta de cimento como, também, a ela estejam completamente aderidos; além disso os vazios entre os grãos do agregado devem ser inteiramente preenchidos pela pasta. Uma mistura heterogênea pode ocasionar falhas e rupturas no produto, o que torna essa operação tão importante quanto a dosagem ,pois, põe em questão a sua durabilidade, (CETESB, 1985).

A durabilidade é uma das principais condições exigidas aos materiais de construção. A sua redução pode ser consequência de causas externas (ambientais), ou internas. A deterioração em ambiente agressivo resulta quase sempre, de ações mecânicas, físico-químicas , do intemperismo, da ocorrência de temperaturas elevadas, da abrasão, da ação eletrolítica e do ataque de águas.

A ação de uma água pode ser mais ou menos agressiva, dependendo da sua composição e do aglomerante empregado no concreto. Dependendo da quantidade de cal e ácido carbônico, essas águas podem ser classificadas em ácidas , neutras ou alcalinas. O cimento portland é um aglomerante hidráulico que não é atacado pela água, pelo menos numa extensão que possa ter algum significado prático. No

entanto a água pode danificar a pasta de cimento por um processo de dissolução e lixiviação.

O processo da ação das águas pode resumir-se como segue: ela pode dissolver a cal livre que, em alguns aglomerantes, representa uma quantidade significativa logo, hidrolisa os compostos calcários, começando pelo aluminato cálcico, do qual dissolve primeiramente a cal, e logo o silicato monocálcico. Além desse efeito principal, desenvolvem-se ações secundárias que aceleram ou retardam o processo. Contra as mesmas é conveniente o emprego de aglomerantes que tenham a menor quantidade de cal livre, com índice de hidraulicidade maior que 1, como os cimentos pozolânicos, rápidos e aluminosos, ( CETESB, 1985 ).

Muitos ácidos atacam o cimento transformando seus constituintes em sais solúveis. Em geral, os cimentos têm uma reação alcalina e são atacados pelos ácidos em maior ou menor proporção. Neste ataque, liberta-se a sílica coloidal solúvel, e produzem-se os sais metálicos correspondentes. Quanto mais concentrado for o ácido, mais enérgica e rápida será a ação. De qualquer modo a ação dos ácidos capaz de produzir dano na pasta do cimento, não é comum e a agressão só se manifesta para valores de pH inferiores a 6,5.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento na ET-61 (ABC-ET-61), a ocorrência de soluções ácidas na natureza é limitada, quando comparada por exemplo, com aquelas que contém sulfatos. A maioria dos sulfatos atacam severamente a pasta endurecida do concreto. Uma exceção é o sulfato de bário (barita) que é praticamente insolúvel na água e além disso não é agressivo.

Os sulfatos reagem com o hidróxido de cálcio livre e o aluminato de cálcio hidratado. As reações envolvem aumento de volume dos sólidos e causam expansão. Esta por sua vez, promove fissuração que, sob exposição contínua a soluções que contém sulfatos, pode resultar na total deterioração da pasta endurecida. O ataque pelos sulfatos pode ser considerável, até mesmo para baixas concentrações de  $\text{SO}_3$ , como 500 mg/L, (ABC-ET-61).

Segundo MEHTA (1994), as concentrações limites de sulfatos solúveis para concreto, são as seguintes:

- Maior que 0,1% no solo (150 mg/l na água): põe em risco a durabilidade do concreto;
- Maior que 0,5% no solo (2 000 mg/l na água): traz sérios efeitos no concreto.

O ataque por sulfato pode ocorrer de duas maneiras:

- Expansão: Ocorrendo fissura, a água penetra mais facilmente no seu interior devido ao aumento de permeabilidade, provocando deterioração.
- Perda progressiva de resistência e perda de massa: se dá devido a deterioração na coesão dos produtos de hidratação do cimento. O hidróxido de cálcio e as fases portadoras de alumina são os elementos mais vulneráveis ao ataque de íons sulfatos.

A natureza do contato entre os sulfatos e o concreto influi consideravelmente no fenômeno. Assim é que o ataque é mais intenso quando o concreto está sujeito a ciclos alternados de molhagem e secagem, ou seja, nas estruturas marítimas ao nível da água, e nas subterrâneas ao nível do lençol freático. Conseqüentemente, a corrosão é menor quando o concreto está completamente e continuamente submerso na água agressiva ou quando o solo, contendo sulfato é seco, (ABC-ET-61).

O movimento da água subterrânea pode afetar a agressividade. Assim é que o concreto sujeito à pressão de uma água agressiva com sulfato, por um só lado, sofre mais que o totalmente envolvido.

Na hidratação do cimento portland, a maior parte da alumina estará sob forma de monossulfato hidratado ( $C_3A \cdot CS \cdot H_{18}$ ), se o teor de  $C_3A$  for maior que 5%. Caso o teor for mais que 8%, os produtos da hidratação também conterão  $C_3A \cdot CH_{18}$ .

Quando a pasta de cimento entra em contato com íons sulfato, na presença de hidróxido de cálcio, ambos os hidratos que contém a alumina são convertidos na etringita  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4$ , a qual é altamente sulfatada.

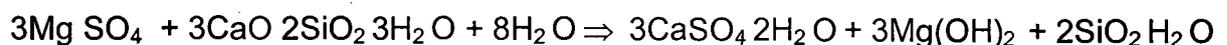
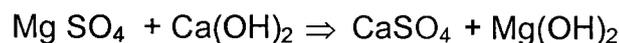
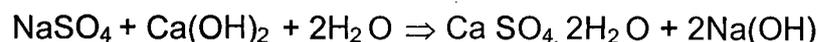
As expansões no concreto relacionadas ao sulfato se devem a etringita, (ALVES, 1992). Duas das principais hipóteses apoiadas pelos pesquisadores são:

- 1- O esforço da pressão é causado pelo crescimento dos cristais na formação da etringita.
- 2- A expansão se deve a adsorção de água pela etringita pouco cristalina.

Deve ser dada especial atenção à relação água/cimento de um concreto a ser executado em ambiente agressivo. Ela deve ser a mais baixa possível. A melhoria da resistência ao ataque dos sulfatos é obtida, também, pela adição de pozolanas ou, eventualmente, a substituição do cimento por esse material. CETESB (1985), recomenda o emprego de cimentos especiais (cimento aluminoso, metalúrgico, pozolânico, super-sulfatado, etc.).

Vários fatores influem na intensidade do ataque pelos sulfatos, sendo de grande importância a concentração desses sais no solo e na água. O tipo de sulfato e de outros íons, na solução, também afetam a intensidade do ataque. O sulfato de magnésio, por exemplo, é muito mais agressivo que o de cálcio.

Dependendo do tipo de cátion presente na solução de sulfato ( $\text{Na}^+$  e  $\text{Mg}^{++}$ ), tanto o  $\text{Ca(OH)}_2$  quanto o CSH da pasta do cimento podem ser convertidos em gipsita pelo ataque de sulfato, a qual também é capaz de causar expansões. A deterioração da pasta de cimento Portland endurecida pela formação da gipsita sofre um processo, o qual é responsável pela redução da rigidez e resistência, seguido por fissuração e transformação final do material em uma massa pastosa.



As reações acima mostram que o ataque por sulfato de magnésio é mais grave, pois a conversão do  $\text{Ca(OH)}_2$  em gipsita é acompanhada pela formação do

$\text{Mg(OH)}_2$  (pouco alcalino e relativamente insolúvel) não assegurando desta forma a alcalinidade do sistema, essencial para a estabilidade na fase cimentícia. O CSH é ainda atacado pela solução de sulfato. No ataque por  $\text{NaSO}_4$ , a alcalinidade do sistema é garantida pela presença do  $\text{Na(OH)}$ .

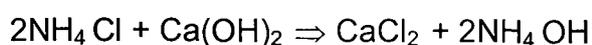
Os álcalis  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  encontram-se freqüentemente no cimento Portland, em teores de 0,5 a 1,3%. Agem como aceleradores de pega e quando seu teor é superior a 0,6% no cimento, provocam expansões anormais nas argamassas em certos agregados de composição química determinada (contendo sílica amorfa), (ABC-ET-61).

Uma solução de soda, por exemplo, começa por diminuir o tempo de pega, porém, aumentando-se sua proporção, chega-se a um ponto a partir do qual volta a aumentar o tempo de pega do cimento. A causa da ação aceleradora de pega do cimento provém da coagulação da sílica e do aluminato hidratado coloidais. A mesma ação é exercida pelos carbonatos e cloretos alcalinos, ( CETESB, 1985).

Através da reação por troca de cátions, as soluções de cloreto de amônia e sulfato de amônia podem transformar os componentes da pasta de cimento em produtos altamente solúveis. Os sais de amônia, quando decompostos pelo  $\text{Ca(OH)}_2$  do cimento deteriorizam o concreto pela formação do sal de cálcio.

A liberação da amônia faz com que este sal solúvel seja carreado para fora do concreto. Contudo, a ação do sal depende do tipo de radical ligado ao íon amônio. Quando o radical der origem a um sal de cálcio insolúvel (oxalatos e carbonatos), o sal de amônia não é perigoso, aliás, até proporciona ajuda na formação de uma camada protetora no concreto.

A reação abaixo expõe um exemplo.



Sendo os dois produtos da reação solúveis, os efeitos da reação são mais graves que, por exemplo, uma solução de  $\text{MgCl}_2$ . Esta última resultaria na formação

do  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{Mg}(\text{OH})$  (produto insolúvel), evitando então a permeabilidade e porosidade do sistema.

As soluções de magnésio reagem com o hidróxido de cálcio presentes na pasta do cimento Portland para a formação de sais solúveis de cálcio. A solução de  $\text{MgSO}_4$  é mais agressiva que as de cloreto e bicarbonato de magnésio, pois o íon sulfato destrói os hidratos que contém a alumina presentes na pasta do cimento Portland.

Óleos, graxas e adubos orgânicos também agem sobre os materiais de construção a base de cimento. Os óleos de origem vegetal ou animal, ao se decomporem por oxidação em contato com o ar, formam os ácidos graxos que reagem com a cal da argamassa, originando a formação de sabões com a conseqüente ação destrutiva sobre a massa, (CETESB, 1985)

Como meio de proteção empregam-se soluções de silicato de sódio aplicados nas superfícies de concreto. Algumas resinas artificiais também dão bons resultados nesses casos, evitando a ação de graxas e óleos.

Existem outros revestimentos à base de sais metálicos do ácido fluorsilícico que, aplicados em forma de pintura na superfície de argamassas ou concreto, reagem com a cal produzindo fluoretos duplos e ácido silícico, aumentando consideravelmente a dureza das superfícies e sua impermeabilidade.

Os adubos orgânicos atacam as argamassas e concretos quando estes ainda estão frescos, o mesmo não ocorrem se estiverem devidamente curados e durante o período da pega.

Entre as causas internas que podem afetar um material a base de cimento, por exemplo, no concreto, destacam-se a permeabilidade, a reação álcali-agregado e as variações de volume devido as diferenças entre as propriedades térmicas do agregado e as da pasta.

A deterioração do concreto por corrosão manifesta-se por um gradual decréscimo de sua resistência, aumento de volume, aumento de permeabilidade e por fim aparecimento de fissuras visíveis.

Logo pode-se concluir que, provavelmente, isto ocorrerá também para outros materiais a base de cimento, pois, do ponto de vista da composição do material a deterioração acontece justamente pelo ataque a pasta de cimento.

Entre as causas internas ainda pode-se citar a mistura homogênea e dosagem, como já foi comentado anteriormente, e compatibilidade dos mesmos com o cimento e com aditivos.

A compatibilidade de alguns resíduos com a técnica baseada em cimento é apresentada por CETESB (1985). São os seguintes:

- Solventes orgânicos e óleos: muitos impedem o endurecimento;
- Sólidos orgânicos (plásticos, resinas, alcatrão): tem boa compatibilidade, geralmente aumenta a durabilidade;
- Inorgânicos (resíduos ácidos): o cimento neutralizará os ácidos;
- Oxidantes, metais pesados e materiais radioativos: são compatíveis.

O anexo 1 apresenta algumas técnicas baseadas em cimento e usando aditivos que foram desenvolvidas e até mesmo patenteadas internacionalmente com a finalidade de tratar resíduos. Estas técnicas, chamadas de processos específicos, citam os resíduos compatíveis e incompatíveis com o processo criado, FREEMAM (1989).

#### 3.4.2 Aspectos ambientais

No que se refere aos aspectos ambientais, o principal interesse na S/E de resíduos industriais, principalmente para que possam ser reaproveitados como materiais de construção, é que os componentes poluentes não migrem para o meio ambiente.

Segundo BATCHELOR (1992), o processo de tratamento de S/E pode reduzir a mobilidade dos contaminantes de duas formas. Primeiro, os contaminantes são represados em uma matriz sólida que restringe fisicamente sua mobilidade. Segundo, a forma do contaminante pode ser mudada para uma forma menos móvel através de reações químicas como precipitação, ou óxido - redução. Ambos os mecanismos físicos - químicos agem simultaneamente para manter a imobilização do contaminante. Porém, dificilmente um processo de S/E é 100% eficaz, e alguns contaminantes sempre acabarão sendo depositados no ambiente. Logo, testes são necessários para se avaliar o material solidificado, quanto aos aspectos ambientais, principalmente se está sendo avaliada a possibilidade de utilização na construção civil.

Segundo CHAMIE (1994), o teste de lixiviação é o mais utilizado na determinação da estabilidade química e do potencial poluidor de uma matriz contendo resíduos. A lixiviabilidade é determinada expondo-se o resíduo S/E a uma solução com características conhecidas determinando-se o grau de dissolução dos contaminantes. Na avaliação do material, é realizada uma comparação entre a concentração do contaminante no lixiviado e no resíduo bruto. Estes valores indicam a quantidade de elementos liberada para o meio.

Há vários mecanismos que controlam a lixiviação, o conhecimento destes permite fazer uma avaliação dos contaminantes ao longo do tempo, em certas condições e quais serão suas conseqüências. Mecanismos físicos de relargagem dependem da geometria do material, como tamanho e forma. Deve ser feita a distinção entre os materiais granulares e monolíticos. Parâmetros químicos como pH, condições redox e formação de complexos solúveis também afetam a liberação de contaminantes.

Entre os mecanismos químicos, o pH tem sido o parâmetro mais intensamente estudado. Segundo SLOOT (1991), cinzas leves de carvão mineral tem seu pH na faixa de 4 a 12,5, dependendo da concentração de CaO. A maior parte dos íons tem lixiviação mínima na faixa de pH 7 a 10. Cinzas ácidas tendem a ter seu pH aumentado e as alcalinas a neutralizar. Os íons de chumbo e cobre apresentam lixiviação mínima na faixa de 7 a 10, enquanto que para os íons de arsênio e molibdênio, o comportamento é oposto. A lixiviabilidade de produtos estabilizados com cimento é fortemente influenciada pela alta alcalinidade da matriz. O fator de retenção nestes produtos é função do pH.

Portanto, para a utilização de resíduos em materiais de construção é necessário um controle da liberação de contaminantes para o meio. Uma predição dos impactos ambientais requer conhecimentos dos mecanismos de lixiviação e das condições que o material vai ser exposto durante sua vida útil. A caracterização de um material residual vai depender principalmente da aplicação que se deseja dar, ou da forma que este vai ser disposto. Deve-se utilizar testes que com menor custo e tempo, obtenha-se o maior número de informações.

Atualmente vários testes de lixiviação são empregados para prever o impacto ambiental causado por um resíduo ou matriz contendo resíduo. A maioria destes testes são realizados em extração única em batelada, dando indicação de quanto cada elemento pode ser lixiviado sob uma dada condição específica. Não permitem uma extrapolação para efeitos a longo prazo, nem dão informações sobre os mecanismos de lixiviação. No entanto, os resultados do ensaio expressos em mg/Kg podem ser facilmente convertidos em fluxo de massa, que é o mais apropriado para avaliação de impacto ambiental.

Podemos citar como testes regulamentados o procedimento francês (X-31-210), o suíço e alemão (DIN 384 14 S4) e os americanos (Toxicity Characteristic Leaching Procedure – TCLP e Environmental Protection Agency's Extraction Procedure – EPA EP Toxicity Test ). No Brasil temos a NBR 10.005/ 1987 – Lixiviação de resíduos, que sugere o mesmo procedimento de extração utilizado pelo EPA EP Toxicity Test , e a NBR 10.006/ 1987 – Solubilização de resíduos. Estas normas, como já foi visto anteriormente, classificam os resíduos conforme a NBR 10.004/ 1987 – Classificação de resíduos.

Outro fator que deve ser considerado quanto aos impactos ambientais, ao se solidificar resíduos, é o tipo de resíduo que vai ser misturado. Como já foi comentado anteriormente compostos orgânicos interferem negativamente na cura de matrizes de cimento, assim como na estabilização dos compostos podendo acarretar na lixiviação de elementos.

Desta forma uma caracterização do material quanto ao seu teor de matéria orgânica é necessário. Análises de sólidos totais, fixos e voláteis assim como carbono orgânico total, análise térmica diferencial, perda de massa ao fogo, permitem avaliar este parâmetro.

### 3.4.3 A cinza leve usada como adsorvedora de metais nos processo de E/S com cimento

A Poluição do metal pesado é extremamente perigosa porque estes metais são ambientalmente persistentes e tóxicos. Ao contrário da maioria dos poluentes orgânicos, os metais pesados são geralmente refratários e não podem ser degradados ou facilmente desintoxicados biologicamente. Encontrar soluções efetivas e seguras para resíduos semi-sólidos que contém metais pesados é sempre um desafio para as indústrias, devido em parte, ao custo efetivo das alternativas de tratamento disponíveis.

Nos EUA, conforme WENG (1994), a maioria dos resíduos semi-sólidos ricos em metais são tratados por processos convencionais de alcalinidade – neutralização-precipitação-(ANP). Nos processos ANP, os íons de metal solúvel são removidos enquanto os metais insolúveis tem precipitações hidróxidas. Estes processos tem muitas desvantagens. A presença de ligações orgânicas aquosas nos resíduos líquidos podem retardar a precipitação hidróxido do metal, a qual pode resultar em concentrações de metal residual maiores que a dos padrões ambientais. Além disso a disposição deste tipo de lama é bastante difícil devido a sua limitada estabilidade e lixiviabilidade.

Com a escolha de um adsorvente adequado, o processo de adsorção pode ser uma técnica promissora na remoção dos metais pesados de resíduos semi-sólidos. Vários autores sugeriram adsorventes como alumina, sílica, óxido férrico e carvão ativado, os quais tem geralmente alta capacidade para adsorver metal, mas são caros e difíceis para ser separados do resíduo líquido depois do uso ( WENG, 1994).

Os maiores componentes das cinzas de carvão são, alumínio, sílica, óxido férrico e óxido de cálcio (WENG, 1994). Cada um destes componentes óxidos pode ser um adsorvente ideal de metais. Além disso, o autor relata que a natureza alcalina das cinzas leves faz dela um bom agente neutralizante, sem falar que para aumentar a adsorção de metal por óxidos e hidróxidos pode-se ajustar o pH usando cal ou hidróxido de sódio.

As cinzas tem sido sucessivamente usadas no cimento e no concreto por suas propriedades pozolânicas e cimentosas, as quais são importantes para a resistência e durabilidade do concreto. As cinzas tem um uso potencial no tratamento porque ela pode ser facilmente obtida em larga quantidade e baixo preço.

Muito tem sido relatado sobre a remoção de metais pesados de soluções aquosas pela adsorção feita com cinzas leves segundo Weng (1994), porém, a maioria destes estudos só envolveram resíduos sintéticos e não avaliaram a disposição final das cinzas leves carregadas de metal gerado do processo de adsorção.

No trabalho que WENG publicou em 1994, foram estudadas alternativas para o tratamento de resíduos que contém metais utilizando a cinza leve como adsorvente e, avaliou-se a disposição final das cinzas leves misturada com resíduo metálico pela fixação de cimento. Foram selecionadas duas indústrias que produzem resíduos diferentes. Um dos resíduos contém Cd e outro Zn. Primeiramente misturou-se a cinza com o resíduo, depois com o cimento.

A cinza leve demonstrou ser uma forte adsorvedora de metais pesados para a indústria de resíduos semi-sólidos. A Capacidade de adsorção do Cd e Zn são 0,27 mg/g e 0,05 mg/g, respectivamente.

A resistência a compressão da argamassa decresceu com o aumento das cinzas leves carregadas de metal. Porém, substituindo o cimento com cinza leve carregada de metal a 10%, a resistência da argamassa curada por 56 dias é quase a mesma ou ainda até maior que a amostra de referência. Os resultados indicam que, para um longo prazo, é possível, preparando argamassas com misturas mais trabalhadas, se obter uma resistência tão alta quanto a do cimento.

A RC e os resultados do teste de lixiviação sugerem que o produto resultante deste tratamento pode ser considerado para o uso de material de construção secundário. Porém, uma evolução adicional das propriedades, tais como, força, durabilidade, resistência ao sulfato, ciclos descongelamento/congelamento,

úmido/seco, e mudanças nos volumes da argamassa, estudadas sobre longo período de tempo, é necessário antes que uma recomendação conclusiva possa ser feita sobre o uso desta argamassa para propósitos da construção.

Quanto ao aspecto ambiental, o autor notou que nenhum dos resultados dos testes de lixiviação mostram concentrações de metais pesados que excedam aos padrões de água tratada segundo a ASTM e testes da Environmental Protection Agency's Extraction Procedure EPA-EP. Assim tudo indica que o processo de fixação pode ser ambientalmente seguro.

#### 3.4.4 Cimento portland

O cimento portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Estes constituintes do cimento, quando misturados com a água hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, elevando desta forma a resistência mecânica. Este cimento resulta da pulverização do clínquer, obtido pelo cozimento, até fusão incipiente, da mistura de calcário com argila convenientemente dosada e homogeneizada de tal forma que toda a cal se combine com os compostos argilosos, evitando assim, que após o cozimento se tenha cal livre em quantidade prejudicial. A regularização do tempo do início das reações do aglomerante com a água, é obtida adicionando-se sulfato de cálcio, tomando-se o cuidado de que a medida máxima de  $SO_3$  não ultrapasse 3%. O principal elemento para a obtenção do cimento é o calcário, extraído do óxido de cálcio, o que pode ser demonstrado pela reação abaixo:



Existem cinco tipos de cimento portland, com teores variáveis de compostos do clínquer. O cimento usado neste estudo foi o Cimento Portland comum ou Tipo I.

A composição química básica do cimento portland é a seguinte:

- $C_3S - 3CaO.SiO_2$  - Silicato Tricálcico – Composto essencial do Cimento Portland. Reage em poucas horas.

- $C_2S - 2CaO.SiO_2$  – Silicato Dicálcico – Tem pega lenta, com fraca resistência até os 28 dias, aumentando então rapidamente. Possui baixo calor de hidratação.
- $C_3A - 3CaO.Al_2O_3$  – Aluminato Tricálcico. Tem pega instantânea (necessidade de adicionar gesso), desenvolvendo um altíssimo calor de hidratação.
- $C_4AF - 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$  – Ferro-Aluminato Tetracálcico. Possui pega rápida. Possibilita a sinterização do clínquer à temperaturas mais baixas.

A hidratação do cimento portland ocorre na presença de água. Os silicatos e aluminatos formam produtos de hidratação que, com o transcorrer do tempo, dão origem à uma massa firme e resistente. A velocidade de hidratação decresce continuamente com o transcorrer do tempo. A reação de hidratação dos compostos acontece da seguinte forma:

⇒ Silicatos de Cálcio:

- $C_3S$  :  $2 C_3S + 6 H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3 Ca(OH)_2$
- $C_2S$  :  $2 C_2S + 4 H \rightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2$

Não se hidratam no estado sólido, mas os silicatos anidros, provavelmente, se dissolvem antes, para depois reagirem formando silicatos hidratados menos solúveis que os primeiros, precipitando-se da solução supersaturada. Os compostos hidratados são aparentemente amorfos, mas a microscopia eletrônica mostra o seu caráter cristalino. Sua forma predominante é fibrosa, maciça ou oca, com comprimento variando entre  $0,5\mu m$  e  $2,0\mu m$ , e largura menor que  $0,2\mu m$ .

$Ca(OH)_2$  liberado pela hidrólise do silicato de cálcio forma delgadas lâminas hexagonais.

⇒ Aluminatos Hidratados:

- $C_3A$  :  $C_3A + 6 H \rightarrow C_3AH_6$
- $C_4AF$  :  $C_4AF + 2 Ca(OH)_2 + 10 H \rightarrow C_3AH_6 + C_3FH_6$

A reação do  $C_3A$  com a água é muito violenta, resultando em um enrijecimento imediato, conhecido como pega instantânea; para evitar que isso

ocorra, adiciona-se a gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). O gesso e o  $\text{C}_3\text{A}$  reagem formando um sulfo-aluminato insolúvel.

#### Mecanismo da Pega:

A pega é a mudança da pasta de cimento do estado fluído para o estado rígido. É causada por uma reação seletiva de compostos do cimento. Os dois principais compostos que reagem são o  $\text{C}_3\text{A}$  e o  $\text{C}_3\text{S}$ .

O tempo de início da pega transcree desde a adição de água, até o início das reações de hidratação. Observa-se o aumento na viscosidade e temperatura, e diminuição da trabalhabilidade das argamassas do cimento. O fim da Pega acontece quando a massa do cimento para de se deformar, tornando-se um bloco rígido, porém, de baixa resistência. O endurecimento tem início com o fim da pega e caracteriza-se pelo aumento em coesão e resistência.

Vários são os fatores que influenciam a duração da pega e endurecimento. Um deles são os compostos solúveis. Como exemplo, cloreto de cálcio ( em porcentagens superiores a 0,5%), cloreto de sódio e alcalinos aceleram a pega enquanto que, gesso, carbonato de sódio, óxido de zinco, açúcar, bórax, tanino e ácido fosfórico retardam a pega.

Estes fatores devem ser considerados quando se mistura resíduos com cimento. Dependendo da sua composição pode-se obter uma influência negativa ou positiva sobre a pega e endurecimento da mistura.

# CAPÍTULO

# 4

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 – INTRODUÇÃO

Neste trabalho optou-se por estudar misturas de lodo têxtil e cinza pesada de termelétrica com cimento, com o objetivo de utilizar este produto como material de construção. O ensaio consiste basicamente da mistura de determinadas porcentagens destes materiais, previamente caracterizados, com a condição de que o índice de consistência da massa fique em torno de 222 a 226mm. (O índice de consistência é determinado através do ensaio do índice de consistência normal, onde uma argamassa preparada conforme a norma técnica (NBR-7215-1992) é abatida após moldada num corpo de prova troncocônico. A medida do diâmetro da base do tronco de cone de argamassa é feita com paquímetro. O índice de consistência da argamassa é a média aritmética das medidas e dos diâmetros ortogonais). Essa massa é moldada e colocada para secar naturalmente. À determinados tempos de secagem ela é testada e analisada sob diferentes parâmetros técnicos e ambientais.

As seguintes justificativas levaram à escolha desta metodologia:

- ⇨ Conforme a revisão bibliográfica deste trabalho, sub-produtos industriais contaminados podem ser misturados diretamente com o cimento, permitindo a incorporação dos contaminantes na matriz solidificada.

- ⇨ O pH da matriz de cimento favorece a formação de hidróxidos e carbonatos insolúveis e muitos íons metálicos podem ser incorporados à estrutura cristalina da matriz de cimento imobilizando-os e impedindo a solubilização.
- ⇨ O lodo têxtil é um material com elevado teor de umidade. Esta característica é vantajosa pois, além de se economizar em energia por não precisar secar o material, economiza-se água potável ao utilizar-se a própria água presente no resíduo no processo de hidratação do cimento.
- ⇨ A cinza tem a vantagem de apresentar características de material pozolânico e absorvedor de metais, conforme WENG (1994).
- ⇨ Avaliação da possibilidade da mistura de lodo com cinza é cimento de trazer melhores resultados do que somente lodo e cimento.
- ⇨ Esta técnica , consome o mínimo de energia e de materiais. Basicamente o único material comercial usado é o cimento, sendo que ainda este terá sua porcentagem reduzida pela adição do lodo e da cinza, tendo-se portanto, redução do custo final do produto.
- ⇨ A tecnologia do manuseio e mistura de cimento é bem conhecida e utiliza equipamentos comuns e baratos.

A metodologia adotada neste experimento é mostrada no fluxograma da figura 4.1

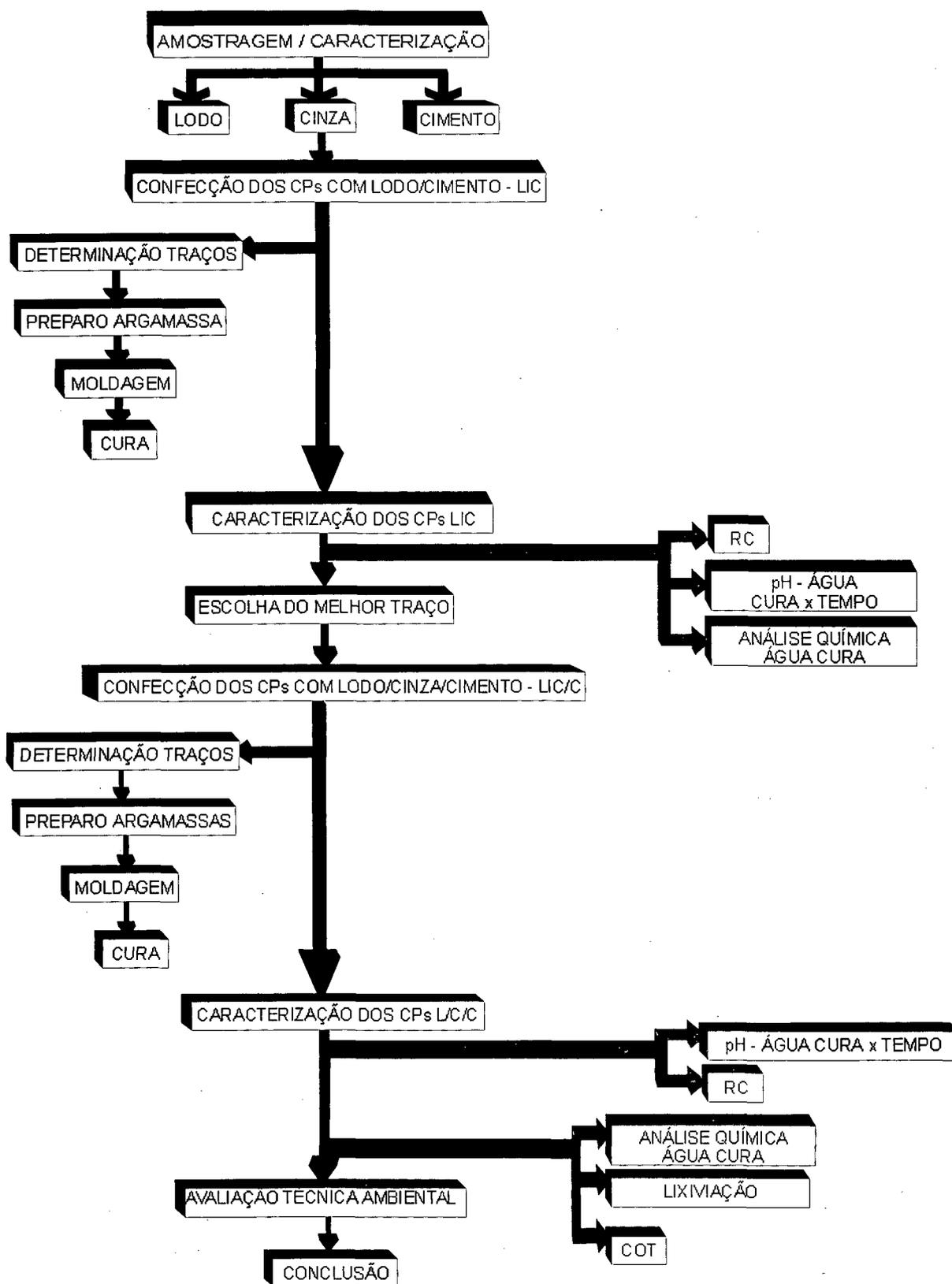


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia

## 4.2 - PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Conforme o fluxograma da figura 4.1, podemos observar que o trabalho laboratorial foi realizado em 6 etapas:

1º ETAPA - Amostragem dos materiais;

2º ETAPA - Caracterização dos materiais;

3º ETAPA - Preparação dos corpos de prova de Lodo/cimento (CPs de L/C);

4º ETAPA - Caracterização dos CPs de L/C;

5º ETAPA - Preparação de corpos de prova de lodo/cinza/cimento ( CPs de L/CZ/C);

6º ETAPA - Caracterização dos CPs de L/CZ/C;

### 4.2.1 - 1º ETAPA - Amostragem dos materiais:

Os sub-produtos industriais utilizados no presente trabalho foram: o lodo originado do tratamento de efluentes têxteis de uma indústria têxtil, localizada na cidade de Blumenau, Santa Catarina, e a cinza pesada da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo. O cimento escolhido foi o cimento Portland tipo 1- CP-I-S-32. A amostragem dos materiais seguiu a norma NBR 10007 da ABNT.

O lodo foi coletado na ETE da indústria ao sair da prensa desaguadora para um container, (figura 4.2). A amostragem seguiu os pontos estabelecidos no quadro tanque de amostragem, na tabela 3 da NBR 10007. O material foi armazenado em recipientes plásticos opacos com tampa, capacidade de 70 L, fechados hermeticamente.

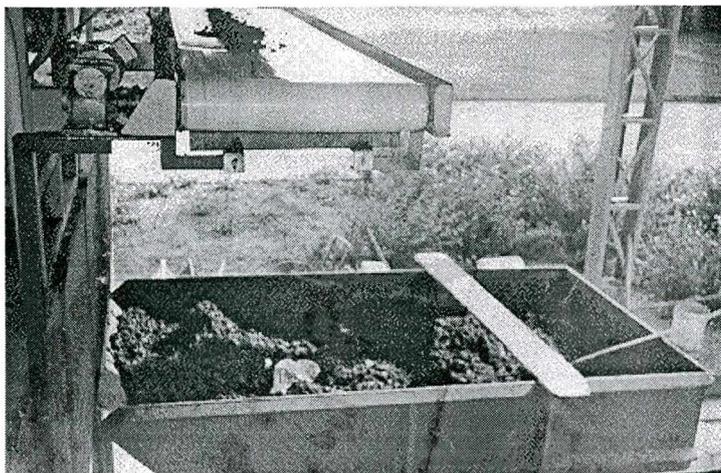


Figura 4.2 - Ponto de coleta do lodo têxtil

Uma parte da amostra ficou sobre refrigeração para os ensaios necessários . O restante, como não havia espaço no refrigerador e considerando que na prática não se irá armazenar o material sob refrigeração para uma posterior utilização, foi deixado nos recipientes plásticos em local coberto, a temperatura ambiente.

A cinza foi coletada em sacos plásticos diretamente nas pilhas das bacias de sedimentação, em 3 pontos diferentes conforme quadro montes ou pilhas de resíduos, da tabela 4 da NBR 10007. Os sacos devidamente fechados foram armazenados em local coberto a temperatura ambiente.

O cimento foi armazenado conforme recebido do fabricante, em sacos de papelão. Após abertos e a medida que ia-se usando, eram adequadamente fechados e armazenados dentro de sacos plásticos para não reagirem com a umidade do ar.

#### 4.2.2 - 2º ETAPA - Caracterização dos materiais:

Nos materiais utilizados no processo foram realizadas análises que permitissem estabelecer relações entre a micro-estrutura dos mesmos e as propriedades macroscópicas do produto final como, lixiviabilidade e resistência a compressão.

◇ Os seguintes parâmetros foram analisados :

A. Lodo têxtil:

**Parâmetros estruturais:**

- ⇒ Composição química elementar
- ⇒ Mineralogia através de difratometria ao raio-x ( DRX );
- ⇒ Morfologia e substâncias puras por análise térmica diferencial ( ATD );

**Parâmetros geométricos:**

- ⇒ Análise granulométrica por granulometria a laser;
- ⇒ Morfologia e detecção de partículas pequenas através do microscópio MEV.
- ⇒ Peso específico pelo método do picnômetro;

**Outros parâmetros analisados na lodo têxtil :**

- ⇒ Limite de liquidez com o aparelho de Casagrande;
- ⇒ Umidade pelo método de evaporação em estufa;
- ⇒ Sólidos totais fixos e voláteis pelo método gravimétrico ;
- ⇒ Carbono orgânico total – COT.

**B. Cinza pesada:****Parâmetros estruturais:**

- ⇒ Composição química elementar
- ⇒ Mineralogia através de difratometria ao raio-x ( DRX );
- ⇒ Morfologia e substâncias puras por análise térmica diferencial ( ATD );

**Parâmetros geométricos:**

- ⇒ Análise granulométrica por granulometria a laser;
- ⇒ Morfologia e detecção de partículas pequenas através do microscópio MEV.

**C. Cimento:****Parâmetros estruturais:**

- ⇒ Composição química elementar

⇒ Mineralogia através de difratometria ao raio-x ( DRX );

Parâmetros geométricos:

⇒ Morfologia e detecção de partículas pequenas através do microscópio MEV.

#### 4.2.3 - 3º ETAPA- Preparação dos corpos de prova de lodo/cimento (CPs de L/C):

Antes da preparação dos corpos-de-prova de lodo-cimento, foi realizado um teste de mistura preliminar com a finalidade de se fazer uma avaliação da resistência da lodo misturado com cimento. Misturou-se 40,50,60 e 70% de lama com cimento num total de 100% e moldou-se um corpo-de-prova de cada mistura num molde cilíndrico. Após secagem ao ar livre durante 3 dias observou-se que misturas acima de 40%, não apresentavam um bom resultado de resistência ao quebrar-se com a mão além do aparecimento de fungos e mau cheiro após mais alguns dias de observação. Com base nos resultados definiu-se que iria-se moldar traços de 40, 30, 20, e 10% de lodo.

Para cada diferente tipo de traço, foram preparados doze corpos-de-prova, para tornar possível a realização do ensaio de resistência a compressão aos sete, quatorze, vinte e oito e noventa dias de idade, sendo ainda que para cada traço e para cada idade tem-se três corpos-de-prova, afim de que a resistência equivalente para cada tipo de mistura, seja a média aritmética de três resultados. Pela tabela 4.1 abaixo, é possível verificar o exposto acima:

Tabela 4.1- Plano de moldagem dos CPs L/C

Traço	Idade de rompimento dos CPs			
	7 Dias	14 Dias	28 Dias	90 Dias
Porcentagem Lodo-cimento				
10-90	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>
20-80	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>
30-70	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>
40-60	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>

onde: CP<sub>1</sub>: corpo-de-prova número 1  
 CP<sub>2</sub>: corpo-de-prova número 2  
 CP<sub>3</sub>: corpo-de-prova número 3

Observação: Para simplificar a linguagem e escrita, os traços de lodo-cimento serão denominados daqui por diante da seguinte forma:

- ⇒ Traço 10 - o que utilizou-se 10% de lodo e 90% cimento
- ⇒ Traço 20 - o que utilizou-se 20% de lodo e 80% cimento
- ⇒ Traço 30 - o que utilizou-se 30% de lodo e 70% cimento
- ⇒ Traço 40 - o que utilizou-se 40% de lodo e 60% cimento

As argamassas foram preparadas levando-se em conta a umidade natural do lodo e o índice de consistência de 222 a 226mm. A umidade natural do lodo determinada previamente na fase de caracterização, permitiu controlar a quantidade de água a ser acrescida à argamassa, afim de adequá-la ao índice de consistência estabelecido.

Para que fosse possível comparar os resultados com uma amostra de referência, também foram moldados CPs somente com cimento e água.

Os CPs após moldagem, foram deixados em recipientes com água potável para cura até a data do ensaio de resistência. A água de cura foi analisada quimicamente, por isso cada 3 CPs de cada traço, que seriam rompidos na mesma idade, foram imersos em um recipiente com 5L de água, possibilitando-se assim uma relação igual de solubilização dos elementos químicos ao longo do tempo. (Figura 4.3)

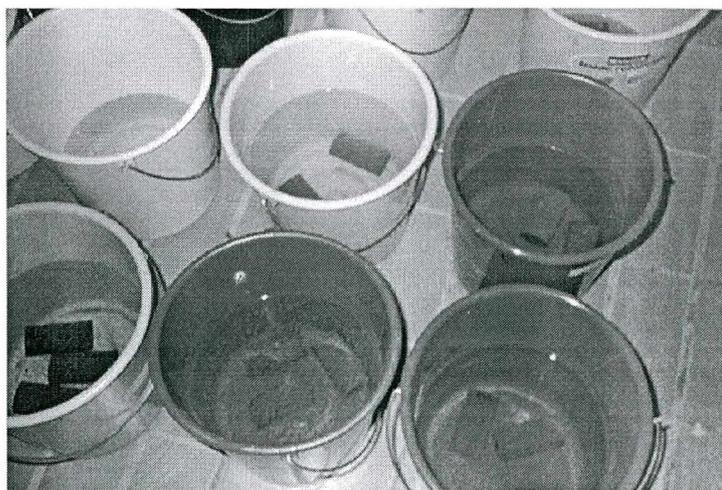


Figura 4.3 – Corpos de prova imersos na água para cura

#### 4.2.4 - 4º ETAPA - Caracterização CPs de L/C:

Nesta etapa do trabalho, o material solidificado foi submetido a ensaios para avaliação do processo aplicado. As seguintes análises foram realizadas:

1) Resistência à compressão:

Após realização da moldagem, os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de resistência a compressão nas idades determinadas.

2) pH :

A variação do pH da água de cura, onde encontravam-se os CPs, foi medido ao longo dos 90 dias .

3) Análise química qualitativa:

A água de cura dos CPs com 30% de lodo foi submetida a uma análise química quantitativa e qualitativa por cromatografia líquida.

4) Análise no DRX e MEV:

O material solidificado também foi avaliado quanto ao seu estado morfológico e mineralógico. Como não havia condições de se analisar todos os CPs e considerando que na engenharia civil usa-se como referência a RC determinada aos 28 dias de idade, somente os CPs rompidos com esta idade foram analisados .

#### 4.2.5 - 5º ETAPA - Preparação de corpos de prova de lodo/cinza/cimento ( CPs de L/CZ/C):

Avaliados os resultados dos CPs moldados na 3º etapa, optou-se pelo traço com 30% e 40% de lodo para adicionar-se cinza pesada à mistura, pois estes apresentaram melhores resultados de RC e os valores de pH não mostraram grandes variações. (Nesta etapa ainda não se tinha resultados de outras análises). Procedeu-se então, o ensaio de solidificação com lama, cinza e cimento, conforme a

2º etapa, com exceção do ensaio preliminar. As porcentagens de cinza variaram para cada porcentagem de lodo na quantidade de 10, 20, 30, 40%. A cinza foi misturada aos demais componentes na forma seca. Pela tabela 4.2 é possível verificar o exposto acima:

Tabela 4.2: Plano de moldagem dos CPs de L/C/C

Traço	Idade de rompimento dos CPs			
	7 Dias	14 Dias	28 Dias	90 Dias
30-10-60	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>
30-20-50	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>
30-30-40	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>
30-40-30	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>
40-10-50	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>
40-20-40	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>
40-30-30	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>
40-40-20	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub> , CP <sub>3</sub>

Observação: Para simplificar a linguagem e escrita, os traços de lodo-cinza-cimento serão denominados daqui por diante da seguinte maneira:

- ⇒ Traço 31 - o que utilizou-se 30% de lodo, 10% de cinza e 60% cimento
- ⇒ Traço 32 - o que utilizou-se 30% de lodo, 20% de cinza e 50% cimento
- ⇒ Traço 33 - o que utilizou-se 30% de lodo, 30% de cinza e 40% cimento
- ⇒ Traço 34 - o que utilizou-se 30% de lodo, 40% de cinza e 30% cimento
- ⇒ Traço 41 - o que utilizou-se 40% de lodo, 10% de cinza e 60% cimento
- ⇒ Traço 42 - o que utilizou-se 40% de lodo, 20% de cinza e 50% cimento
- ⇒ Traço 43 - o que utilizou-se 40% de lodo, 30% de cinza e 40% cimento
- ⇒ Traço 44 - o que utilizou-se 40% de lama, 40% de cinza e 30% cimento

#### 4.2.6 - 6º ETAPA – Caracterização dos CPs de L/CZ/C:

Nesta etapa realizou-se os mesmos ensaios da 3º etapa e ainda o ensaio de lixiviação, conforme a NBR10005, e carbono orgânico total.

A análise de água de cura, o ensaio de lixiviação e COT foram realizados somente sobre 3 traços e também sobre o lodo têxtil in natura (para que se pudesse comparar os resultados antes e após solidificação do lodo).

Devido a problemas experimentais, de prazo para concluir o cronograma de trabalho e principalmente econômico, teve-se de reduzir as análises químicas e trabalhar apenas com alguns traços. Foi difícil a escolha mas optou-se por fazer a análise de 3 traços: o 30 pelo melhor resultado de resistência a compressão levando em consideração a quantidade de resíduo utilizada, o 31 eo 33 para que se pudesse se comparar 2 traços com a mesma porcentagem de lodo e diferentes porcentagens de cinza , possibilitando a análise da suposta reação adsorvedora da cinza pesada por metais ( conforme WENG (1991)).

A seguir são descritos detalhadamente os métodos analíticos e processo de mistura empregados nas diferentes etapas da metodologia do trabalho.

### **4.3 – MÉTODOS ANALÍTICOS**

#### **4.3.1 - Diffractometria ao raio X**

A análise por difração de raio-X tem como função a determinação mineralógica qualitativa do material, principalmente da fase cristalina, de modo rápido e eficiente. Em certos casos, pode ser útil para analisar os hidratos mal cristalizados.

Este ensaio consiste em gerar um feixe de raio-X fazendo-o atingir a amostra. O feixe assim obtido é detectado e de acordo com sua intensidade são registrados graficamente. A identificação das substâncias cristalinas contidas na amostra analisada é feita através de um software conectado ao aparelho. Os gráficos obtidos são comparados com a carta padrão que faz parte do programa, e permite fazer a identificação das substâncias presentes.

As amostras submetidas aos ensaios podem estar em forma de pó ou sólida. Os difratogramas de raio-X foram obtidos através do aparelho SIEMENS com tratamento automático.

#### 4.3.2 - Análise térmica diferencial - ATD

O método registra as diferenças de temperatura entre um material padrão e o material estudado. Os materiais são aquecidos à velocidade constante. Curvas são traçadas cujas deflexões em sentidos opostos representam as transformações endotérmicas e exotérmicas. Pela posição, forma e intensidade das curvas é possível a identificação de substâncias puras. Também pode-se detectar substâncias amorfas e materiais não-cristalinos. Neste trabalho, a análise térmica diferencial fornece informações adicionais às difrações ao raio-X, no caso de detecção de substâncias amorfas e de materiais não-cristalinos.

#### 4.3.3 - Microscopia eletrônica de varredura – MEV

O Microscópio Eletrônico de Varredura permite a observação e análise microestrutural de objetos sólidos. Portanto, através deste ensaio é possível obter as seguintes informações:

- ⇒ morfologia ou estado cristalino das partículas;
- ⇒ detecção de pequenos teores de elementos e compostos não detectáveis pela difração ao raio-X;
- ⇒ presença de materiais e minerais amorfos;

As amostras analisadas por este aparelho podem ser pulverulentas ou sólidas. No caso de amostras sólidas a maior dimensão deve ser inferior a 17mm, sendo que estas devem possuir o mínimo de umidade possível. O aparelho só detecta compostos com número atômico superior a 12, ou seja, acima do carbono.

A habilidade do microscópio à varredura em fornecer as informações descritas acima, depende inteiramente da técnica de preparação das amostras. As observações realizadas sobre os materiais foram feitas no microscópio eletrônico a varredura modelo PHILIPS XL30. Sobre frações previamente recobertas com uma fina camada de ouro por vaporização à vácuo. Também faz parte do MEV uma microsonda EDAX. Esta sonda detecta fótons RX característicos de cada elemento químico entrando na composição da amostra.

#### 4.3.4 - Análise granulométrica

A análise granulométrica é utilizada para determinar a distribuição da dimensão dos grãos dos materiais. O material puerulento é inicialmente colocado em suspensão em um líquido mantido em movimento dentro de um recipiente de faces paralelas. Em seguida a célula de medida é interpolada sobre um feixe de luzes coerente ( laser de néon hélio ). Os grãos em movimento difracionam o feixe de luzes.

O raio difratado é analisado por uma série de detetores fotoelétricos concêntricos. Sendo que a reflexão dos raios luminosos sobre um grão é inversamente proporcional ao diâmetro destes. Se torna possível, através de uma análise estatística das informações coletadas deduzir a granulometria de amostra. Os resultados foram obtidos no aparelho LASER-SYMPATEC-HELOS-VECTRA. Este aparelho permite avaliar os diâmetros dos grãos com dimensões situadas entre 0,1 e 600  $\mu\text{m}$ .

#### 4.3.5 - Densidade real das partículas

Método do picnômetro - NBR 6508:

Primeiramente pesa-se o picnômetro cheio d'água e retira-se cerca de  $\frac{2}{3}$  da água. Reserva-se 50 gramas de material seco em estufa e passante na peneira n.º 4. Põe-se o material reservado no picnômetro e leva-o ao fogo. Ferver por aproximadamente 10 min e deixa-se esfriar até que ele retorne à temperatura ambiente. Completar com água até encher e pesar.(figura 4.4)

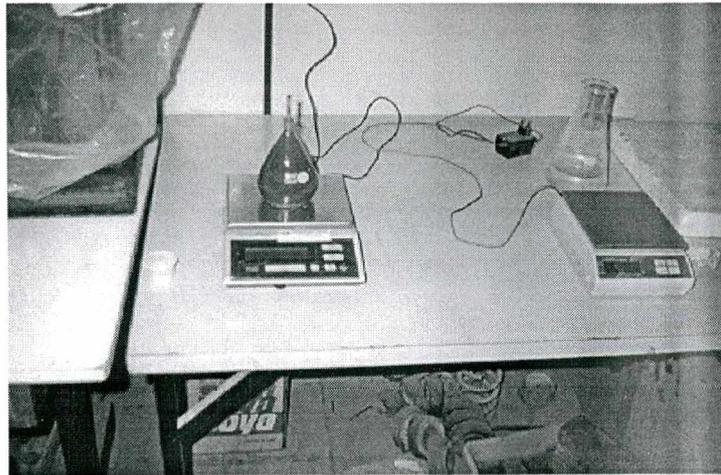


Figura 4.4 – Ensaio do picnômetro-pesagem final

Obtém-se a densidade real das partículas pela seguinte fórmula:

$$\delta = \frac{P1}{P2 - (P3 - P1)}$$

P1 - peso da amostra seca

P2 - peso do picnômetro + água

P3 - peso do picnômetro + água + material

Faz-se no mínimo de três (3) determinações para se obter um resultado médio confiável.

#### 4.3.6 - Limite de liquidez

O Limite de Liquidez (LL), corresponde ao menor teor de umidade (h) que o material pode se encontrar no estado líquido.

O ensaio de LL foi realizado conforme a norma brasileira - NBR 6459:

Utiliza-se o aparelho de Casagrande, onde enche-se sua cuba com o material homogeneizado, faz-se um rasgo dividindo o material pela metade, e com a ajuda de uma manivela faz-se com que a cuba com material tenha quedas de aproximadamente 1 cm. Conta-se o número de golpes (n quedas) que forem necessários para que haja um fechamento do rasgo feito em pelo menos 1 cm.

Retira-se uma porção do material da parte central e determina-se o teor de umidade ( h ) deste. Assim tem-se um par (h, n).

Adiciona-se água ao restante do material, homogeniza-o novamente e repete-se o ensaio. É interessante que se obtenha pelo menos cinco (5) determinações com número de golpes (n) variando de trinta (30) à quinze (15) golpes.

Com os resultados obtidos faz-se um gráfico n x h e obtêm-se a melhor reta para os pares de pontos. Com esta reta e para número de golpes (n) igual à 25, acha-se o teor de umidade (h) referente ao Limite de Liquidez do material.

#### 4.3.7 Determinação da umidade natural

A umidade natural foi determinada pelo método de estufa. As amostras in natura, previamente pesadas, são submetidas a secagem em estufa á temperatura de 105°C ( $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) até que seja constatada a constância do peso, situação na qual considera-se que toda água livre presente na amostra original foi extraída.

#### 4.3.8 Determinação de sólidos totais, fixos e voláteis

Os sólidos totais de uma amostra nada mais é que a soma da parte sólida orgânica e inorgânica, ou seja da fração volátil e fixa quando submetido ao um ensaio de evaporação e secagem dos líquidos da amostra.

Nos despejos domésticos e industriais, bem como nas lamas, uma das maneiras de se determinar a quantidade de matéria orgânica (m.o.) é através da determinação de sólidos voláteis, assim como os sólidos fixos indicam aproximadamente o teor de sólidos minerais.

A determinação dos sólidos totais, fixo e volátil foi realizada conforme a normalização técnica da CETESB, L5.149 - Determinação de Resíduos em Água. Métodos Gravimétricos, Método A, B e C respectivamente. Cada ensaio foi realizado 3 vezes e o resultado é a média dos valores encontrados.

#### Sólidos totais:

Uma cápsula de porcelana limpa foi deixada em uma mufla a 550°C por uma hora , esfriada em dessecador e pesada .

Uma porção homogênea da amostra colocada na cápsula tarada, foi pesada, evaporada até a secura em banho-maria e seca em estufa a uma temperatura de 105<sup>0</sup>C até peso constante. Após esfriada em dessecador foi novamente pesada . O aumento do peso em relação a cápsula vazia corresponde ao sólidos totais.

Sólidos fixos:

O material obtido na determinação dos sólidos totais, na mesma cápsula, foi submetido a ignição em muflas a 550<sup>0</sup>C por uma hora, esfriado em dessecador e pesado imediatamente. O material restante na cápsula representa os sólidos fixos.

Sólidos voláteis

É obtido por diferença entre os valores dos totais e dos fixos.

Resultados:

Expressão sólidos totais: 
$$\text{g/Kg} = \frac{(M_2 - M_1) \times 1000}{\text{mg amostra}}$$

⇒ M<sub>2</sub>= peso da cápsula com resíduo total

⇒ M<sub>1</sub>= peso da cápsula vazia

Expressão dos sólidos fixos: 
$$\text{g/Kg} = \frac{(M_3 - M_1) \times 1000}{\text{mg amostra}}$$

⇒ M<sub>3</sub> = peso da cápsula com resíduo fixo

Expressão dos sólidos voláteis: 
$$\text{g/Kg} = \text{sólido total} - \text{sólido fixo}$$

#### 4.3.9 - Carbono orgânico total (COT)

Toda matéria oxidável apresenta em sua composição carbono. Se chama de carbono orgânico o carbono presente na fração orgânica de uma amostra e carbono inorgânico na fração inorgânica de uma amostra. O carbono total presente num corpo significa a soma destas duas frações.

Sendo assim pode-se obter dados com relação a matéria orgânica presente num sub-produto industrial realizando-se a análise de COT .

Há várias maneiras de se determinar o COT. Uma delas é através dos modernos equipamentos computadorizados, que além de medirem, processam os resultados.

Neste trabalho usou-se o aparelho japonês TOC 5000-A - TOTAL ORGANIC CARBON ANALYZER - SHIMADZU. Este aparelho segue o seguinte método de análise:

O carbono total (CT) é fixado num tubo de combustão onde ocorre uma oxidação catalítica por aquecimento a  $680^{\circ}\text{C}$  . Um gás é fornecido ao tubo o qual tem seu fluxo controlado em 150ml/min. O controle da pressão e do fluxo máximo é feito por um umidificador. Quando a amostra é introduzida no injetor de amostra e daí para o tubo de combustão, o CT contido na amostra é decomposto na forma de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) . O gás arrasta o  $\text{CO}_2$  gerado no tubo o qual, flue direto para uma reação de carbono inorgânico (CI) num recipiente que é resfriado e secado por um dehumificador. Este então é enviado a uma célula interna fixa onde, um gás analizador (NDIR) detecta o  $\text{CO}_2$  . O NDIR produz uma detecção, o qual gera picos nos quais a área é calculada por um processador de dados.

A área de pico é proporcional a concentração de CT na amostra. Uma curva de calibração é traçada usando uma equação que expressa a relação da área no meio do pico e uma solução padrão de CT. Portanto, a concentração de CT na amostra pode ser obtida pelo cálculo da área de pico relacionando-a com as concentrações correspondentes as áreas da curva padrão.

A referência de carbono total é composta por carbono orgânico total (COT) e (Carbono Inorgânico) CI.

Para a medição do CI, uma amostra é introduzida num injetor e deste para dentro de um reator de CI , onde o gás de arraste vai fluindo sob a forma de minúsculas bolhas na solução acidificada de CI reagente. Somente os compostos de CI da amostra são decompostos em  $\text{CO}_2$ , o qual é detectado pelo NDIR . A concentração de CI pode ser determinada pelo mesmo processo que o CT. Carbono sob forma de carbonatos e carbonatos hidrogenados são medidos como CI.

A concentração de COT é obtida pela subtração do CI do CT pois  $\text{CT} = \text{COT} + \text{CI}$  .

#### 4.3.10 Cromatografia líquida por troca iônica

A análise de alguns elementos químicos foram realizadas por cromatografia iônica e outros por absorção atômica.

A cromatografia de íons é uma técnica que emprega de alguns princípios bem estabelecidos da troca iônica e permite que a condutância elétrica seja usada para a detecção e a determinação quantitativa dos íons em solução, depois da separação.

Entende-se, em geral, por troca iônica a troca de íons de mesmo sinal entre uma solução e um corpo sólido muito insolúvel, em contato com ela. O sólido (trocador de íon) deve conter, como é claro, seus próprios íons. Para que a troca se processe com rapidez, e na extensão suficiente para ter interesse prático, o sólido deve ter uma estrutura molecular aberta, permeável (coluna analítica), de modo que os íons e as moléculas dos solventes possam mover-se para fora e para dentro da estrutura.

O aparelho usado para a análise química de alguns íons encontrados na água de cura e nos materiais lixiviados foi o DIONEX-120. Este aparelho opera segundo

os princípios da cromatografia líquida por troca iônica. Ele permite analisar alguns íons por medida da condutividade. Todas as amostras precisam ser filtradas em filtro de  $0,45\mu\text{m}$  para não saturar a coluna analítica.(figura 4.5).

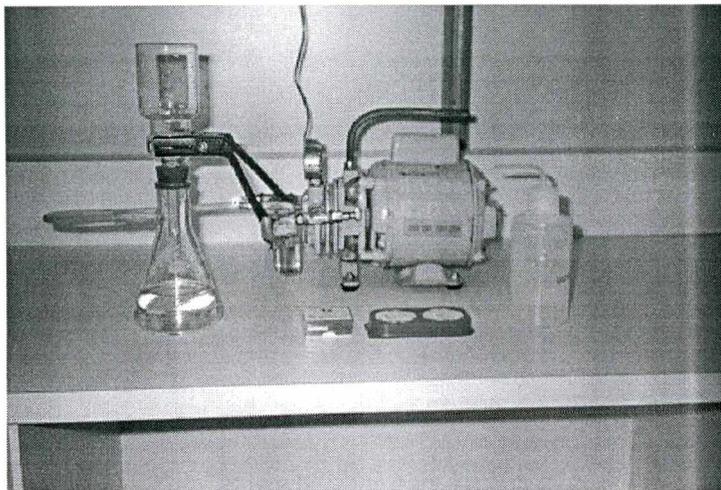


Figura 4.5 – Filtragem das amostras para análise no DIONEX

O aparelho DIONEX –120 É conectado a um computador o qual lê os picos de condutância e mostra os resultados através de um gráfico chamado de cromatograma os resultados são apresentados na tela do computador o qual pode ser impresso. Para cada amostra tem-se um gráfico.

#### 4.3.11 Ensaio de lixiviação

O ensaio de lixiviação foi realizado conforme as recomendações da NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos.

O corpo de prova foi estratificado até que passasse na peneira de 9,5 mm. 100 gramas deste material foi introduzido num recipiente com 1600 ml de água deionizada e colocado num agitador á 6 rpm durante 24 horas. O pH foi controlado com ácido acético . Após centrifugação do material lixiviado, filtrou-se num filtro de  $0,45\mu$  e conservou-se em geladeira para análise dos elementos químico. Uma parte foi preservada com ácido nítrico para o caso de o material não ser analisado no prazo de 7 dias.

#### 4.3.12 Preparação dos corpos de prova

##### Preparo da argamassa

##### Material

- ⇒ misturador mecânico: O misturador mecânico também chamado de argamassadeira consta de uma cuba de aço inoxidável com capacidade de aproximadamente 5 litros e de uma pá de metal, que gira em torno de si mesma e, em movimento planetário, em torno do eixo da cuba, movimentos estes em sentidos opostos.;
- ⇒ balança: devem apresentar resolução de 0,1 g e carga mínima de 1000g;
- ⇒ espátula, bequer.

As etapas desenvolvidas para a execução do experimento, basearam-se nas indicações do Método de Ensaio NBR-7215 da ABNT (NBR-3 do INMETRO). Preparou-se um traço de cada vez verificando-se sempre o índice de consistência da argamassa. A mistura mecânica foi executada segundo as etapas descritas abaixo:

- I. Inicialmente foi colocada de uma só vez na cuba da argamassadeira, a quantidade de lodo desejada, após adicionou-se o cimento, seguido da cinza pesada (no caso da quinta etapa do experimento), e água ( a água, quando necessário, foi sendo adicionada aos poucos até que se obtivesse através do ensaio de consistência, após o processo de preparo da argamassa, o índice de 220 a 226mm). Após a introdução dos materiais na cuba, esta foi ligada durante trinta segundos em velocidade baixa.
- II. Com uma espátula, removeu-se a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba. Esta operação foi realizada em quinze segundos (tempo em que a argamassadeira permaneceu desligada).

- III. A argamassadeira foi novamente acionada na mesma velocidade por cerca de um minuto.
- IV. A retirada da mistura aderida à parede com a argamassadeira desligada e com o auxílio de uma espátula foi repetida, em quinze segundos.
- V. Finalmente, a argamassadeira foi ligada por dois minutos em velocidade alta.

#### Ensaio do índice de consistência (FLOW TEST)

##### Material

- mesa para ensaio de consistência,
- molde rígido troncocônico,
- soquete,
- espátula,
- óleo lubrificante.

##### Moldagem

A moldagem foi feita imediatamente. Antes de efetuar a mistura, lubrificar ligeiramente a mesa do aparelho de consistência com óleo mineral e colocar sobre ela, bem centrada, a forma troncocônica, com sua base maior apoiada na mesa. Um auxiliar, durante a moldagem, mantém a forma na mesma posição, enquanto o operador, com auxílio da espátula, coloca a argamassa na forma, em três camadas sensivelmente da mesma altura e, com soquete normal, aplica 15, 10 e 5 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos, respectivamente, nas primeira, Segunda e terceira camadas. Terminada essa operação, remover o material que ultrapassar a borda superior e alisar o topo com a régua, tomando o cuidado de limpar a mesa em volta do molde, sem remover o óleo mineral.(figura 4.6)

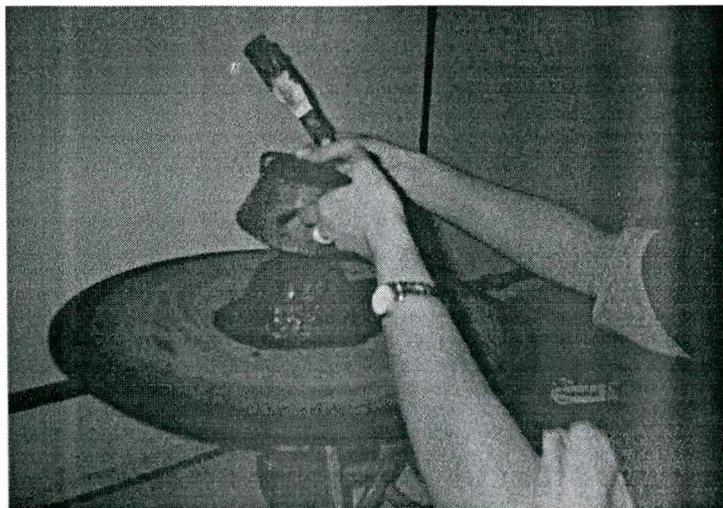


Figura 4.6 - Moldagem (Flow test)

#### Abatimento do corpo-de-prova troncocônico

Terminado o enchimento, retirar imediatamente a forma, levantando-a verticalmente com cuidado e, em seguida, mover a manivela do aparelho para medida de consistência, fazendo com que a mesa caia 30 vezes em aproximadamente 30 s, o que provocará o abatimento do tronco de cone da argamassa.

#### Índice de consistência

A medida do diâmetro da base do tronco de cone de argamassa, após o abatimento, é feita com auxílio do paquímetro e expressa em milímetros. O índice de consistência da argamassa é a média aritmética das medidas de dois diâmetros ortogonais. O ensaio deve ser repetido sempre que houver diferença maior que 5 mm entre as duas medidas.(figura 4.7)

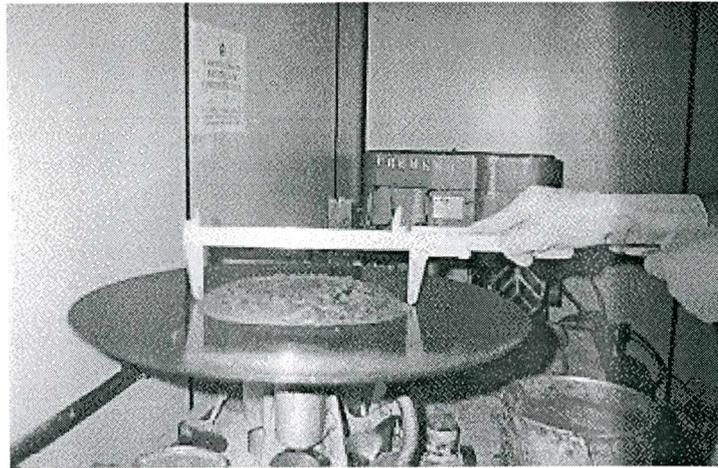


Figura 4.7 - Determinação do Índice de Consistência

#### Moldagem dos corpos -de- prova

A moldagem dos corpos-de-prova destinados ao ensaio de resistência mecânica seguiu as recomendações da NBR 7215 - Cimento Portland.

O molde utilizado na confecção dos corpos de prova destinados ao ensaio de resistência mecânica é composto de forma cilíndrica e base roscada, ambas de metal não corrosível.

A forma cilíndrica deve ser de aço do tipo ABNT 1020 e ter, no mínimo 3 mm de espessura, obedecendo às seguintes dimensões:

Molde: 3 mm de espessura,

( $50 \pm 0,10$ ) mm de diâmetro interno,

( $100 \pm 0,2$ ) mm de altura.

A moldagem dos corpos-de-prova deve ser feita imediatamente após o amassamento e com maior rapidez possível. Para tanto, é necessário que o recipiente que contém a pasta esteja junto aos moldes durante o adensamento. A colocação da argamassa na forma é feita com o auxílio da espátula, em quatro camadas, de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete normal, homogeneamente distribuídos. Essa operação deve ser terminada com a rasadura do topo dos corpos-de-prova, por meio de régua

que o operador faz deslizar sobre as bordas da forma em direção normal à régua, dando-lhe também um ligeiro movimento de vaivém na sua direção.

## Cura

Os corpos-de-prova foram submetidos a um período de cura inicial ao ar e a um período final em água.

### Cura inicial ao ar

Logo após a moldagem, os corpos-de-prova, ainda nos moldes, foram colocados em câmara úmida, onde permaneceram vinte e quatro horas, tendo-se o cuidado de proteger a parte superior com uma placa de vidro plana.

### Cura final em água

Ao encerrar-se o período de cura ao ar, os corpos-de-prova foram retirados das formas e identificados. Cada grupo foi imerso em baldes contendo água, onde permaneceu até o momento em que as idades desejadas foram completadas (sete, quatorze, vinte e oito e noventa dias).

Durante este período, teve-se a preocupação de proteger os corpos-de-prova, fazendo com que toda a superfície permanecesse em contato com a água, e, também, com que os baldes fossem cobertos com uma lona, impedindo desta forma, a contaminação da água. (Figura 4.2).

### Ensaio de resistência mecânica

Os ensaios de resistência consistiram em submeter a mistura solidificada a cargas de compressão, sendo que estas foram aplicadas no sentido do eixo longitudinal.

No momento em que a idade desejada foi completada, as misturas solidificadas foram imediatamente tiradas da cura e transferidas para a estufa, onde permaneceram por vinte e quatro horas a uma temperatura de 60°C. Quando foram retirados da estufa, tomou-se o cuidado de medir suas alturas e seus diâmetros, o

que foi feito com o auxílio de um paquímetro. Estes dados são necessários para o cálculo da resistência.

Contudo, antes ainda de sofrerem os ensaios de resistência à compressão, os corpos-de-prova foram capeados com a mistura de enxofre e cimento na proporção de 3:1, respectivamente.

#### Determinação da Carga de Ruptura

#### Idade

As misturas solidificadas foram rompidas nas idades de sete, quatorze, vinte e oito e noventa dias, como já havia sido comentado anteriormente. É importante mencionar que este tempo é obtido a partir do momento em que o cimento é posto em contato com a água da mistura.

#### Preparação da Máquina de Ensaio

Os pratos da prensa são inicialmente limpados completamente e colocados em operação na escala dinamométrica. O corpo de prova é colocado diretamente sobre prato inferior da prensa de maneira que fique rigorosamente centrado.

A velocidade de solitação, ao transmitir-se a carga de compressão ao corpo de prova, deve ser de  $(0,25 \pm 0,05)$  MPa/s.

A carga máxima de ruptura, em MPa, indicada pela máquina de ensaio, é anotada no final de cada ensaio (Figura 4.8).

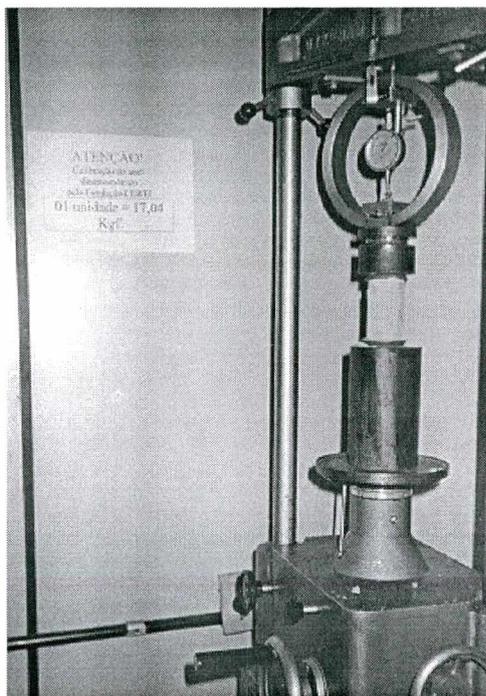


Figura 4.8 – Ensaio de resistência à compressão

# CAPÍTULO

# 5

## APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 5.1.1 Lodo têxtil

O lodo da indústria têxtil, tem uma consistência gelatina e cor cinza escuro, quase preto, no momento da coleta apresentou pH de 7,4. É constituído principalmente de água e matéria orgânica, que pode ser observado pelo resultado do ensaio de perda ao fogo e pela porcentagem semelhante de perda de massa na ATD (tabela 5.1 e figura 5.1). Observa-se a grande perda de massa devido a eliminação da água e de matéria orgânica, até temperatura de 650°C na ATD, onde finalmente acontece uma estabilização. Acima desta temperatura ocorre reações sem variações significativas de massa, como provavelmente transformações de fases.

Tabela 5.1 - Composição Química do Lodo

Elementos	Composição em % de massa
SiO <sub>2</sub>	2.94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.12
MnO	0
MgO	0.81
CaO	1.67
Na <sub>2</sub> O	1.64
K <sub>2</sub> O	0.41
TiO <sub>2</sub>	0.43
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.82
Perda ao fogo	76.42
CO <sub>2</sub> Total	107.44
C orgânico	17.92
S total	1.49
Cl	0.70

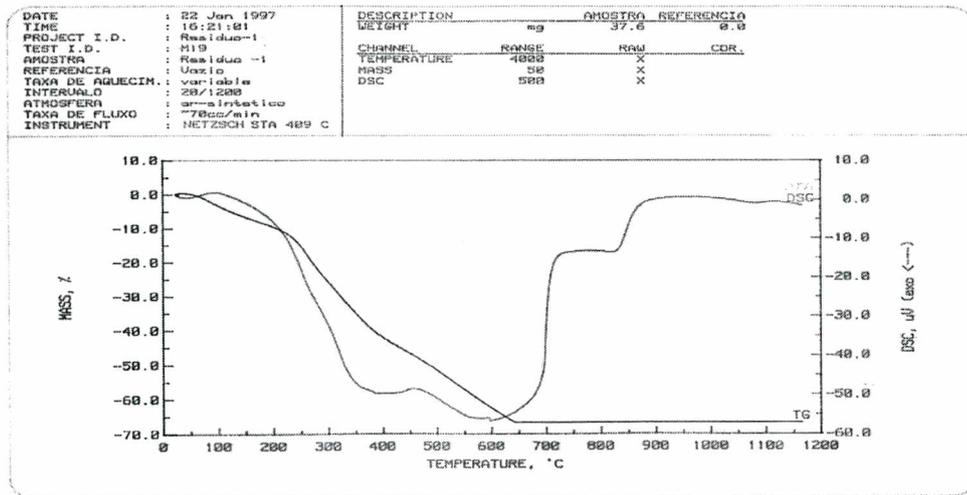


Figura 5.1 - ATD do lodo de têxtil

De acordo com a caracterização físico-química, apresentada na tabela 5.2, o lodo é composto por 86,3% de água, 8,08% de sólidos voláteis e 5,67% de sólidos fixos.

Tabela 5.2 - Características físico-químicas do lodo têxtil

característica	valor
Teor de Umidade	689,47%
Limite de Liquidez	151 %
Densidade	1.51 g/cm <sup>3</sup>
Sólidos Totais	13,7%
Sólidos Fixos	5,67%
Sólidos Voláteis	8,08%
Umidade natural	86,3%

Os sólidos fixos que correspondem ao resíduo mineral resultante é constituído de fosfato e colorantes devido ao elemento fixador de pigmento utilizado no processo fabril. A presença de ferro, alumínio e sódio é devido ao uso de sulfato de alumínio e soda no processo de tratamento de efluente. Podemos também notar na

Tabela 5.3 (resultados obtidos por fluorescência ao raio X -WD XRFs-), elementos potencialmente tóxicos, como chumbo, zinco, níquel, potássio devido ao elemento fixador de pigmento utilizado no processo fabril.

Tabela 5.3 - Resultados da Fluorescência aos raios X do Lodo de Têxtil

Elementos	Amostra 01 (mg/L)	Amostra 02 (mg/L)
CuO	474	561
ZnO	264	242
CaO	266	175
MnO	153	147
NiO	62	69
SrO	82	63
K <sub>2</sub> O	72	48

As características físicas, densidade e limite de liquidez, foram determinados segundo os ensaios geotécnicos destinados à solos. O valor baixo da densidade se justifica pela presença de matéria orgânica. Segundo a teoria de Casagrande, a maioria dos solos tem sua densidade entre 2,65 e 2,85g/cm<sup>3</sup>, diminuindo para os solos que contém elevado teor de matéria orgânica e cresce para solos ricos em óxido de ferro.

O limite de liquidez (LL), de 151% é alto. No entanto se olharmos o gráfico de plasticidade dos solos (ANEXO 3), este material estará abaixo da linha "A" e é exatamente a área onde se encontra os solos siltosos e orgânicos.

O teor de umidade (h) de 733% é bastante alto considerando o h 151% do LL. Este valor dá a idéia que o lodo é bastante fluído, mas na verdade não é assim que ele se apresenta fisicamente. Pode-se pegar com a mão uma porção do lodo sem que ele flua. Este valor se explica por conter o lodo elementos como o amido, usado na engomagem dos tecidos. Além de absorver muita água, o amido proporciona ao lodo uma consistência gelatinosa.

Quanto à granulometria, o lodo têxtil é constituído de grãos com dimensões que variam de 1 a 200 µm, conforme a distribuição granulométrica da figura 5.2 Comparando com a escala granulométrica da ABNT, (ANEXO 4) que classifica os solos conforme a sua granulometria, este pode ser classificado como silte argiloso em mais de 50%, e o restante como uma areia muito fina. Segundo a forma da curva podemos distinguir a granulometria como contínua e bem graduado.

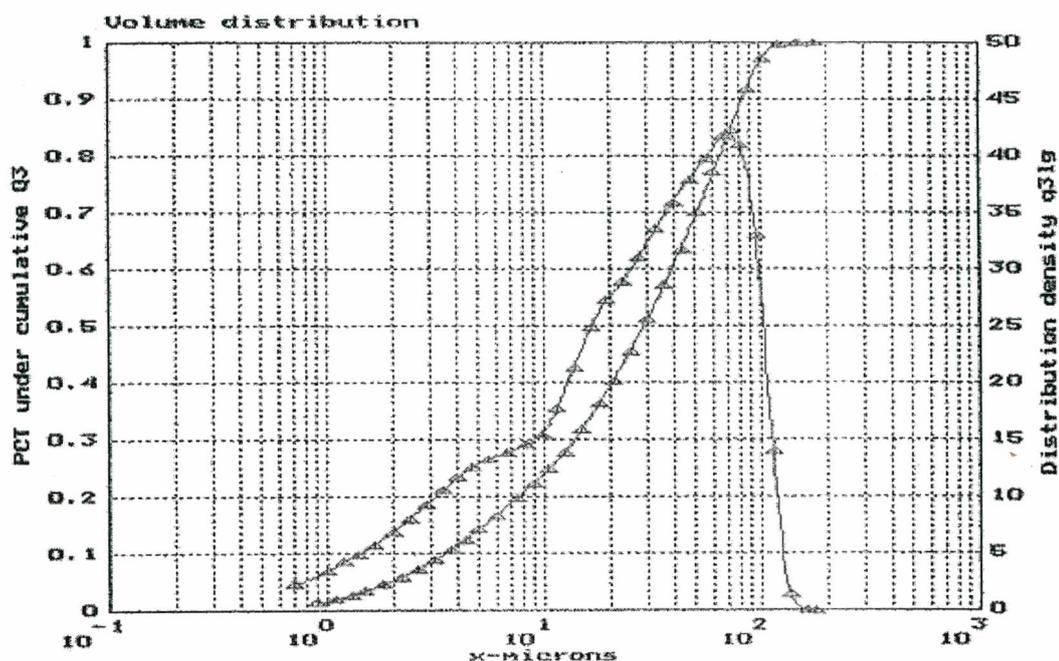


Figura 5.2 - Análise Granulométrica do Lodo

Mais de 50% dos grãos são superiores a  $20\mu\text{m}$ . As partículas de menores dimensões, inferiores a  $30\mu\text{m}$ , que podem ser identificadas nas micrografias das figura 5.3 e 5.4, correspondem as partículas de carbono, que são também evidenciadas através da análise pontual efetuada com a sonda EDAX figura 5.5. As partículas maiores com dimensões superiores à  $50\mu\text{m}$  (figura 5.3 e 5.6), são associadas à presença do alumínio, também observado no diagrama EDAX da figura 5.7

De acordo com a fórmula do coeficiente de uniformidade (Cu):

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

$5 < Cu$	→ muito uniforme
$5 < Cu < 15$	→ uniformidade média
$Cu < 15$	→ desuniformidade

e o gráfico de granulometria a laser, o Cu do lodo é:

$$Cu = \frac{40}{4} = 10 \quad \text{logo, o material apresenta uniformidade média.}$$

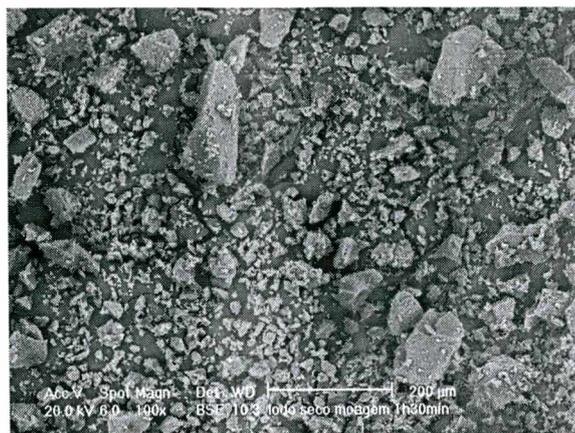


Figura 5.3 - Micrografia MEV do Lodos

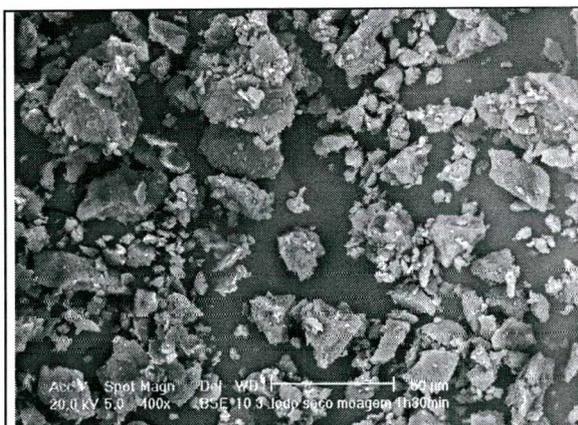


Figura 5.4 - Micrografia MEV das partículas pequenas do Lodo

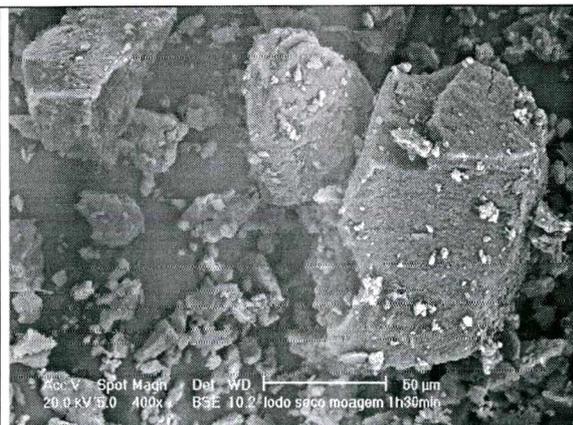


Figura 5.5 - Micrografia MEV das partículas

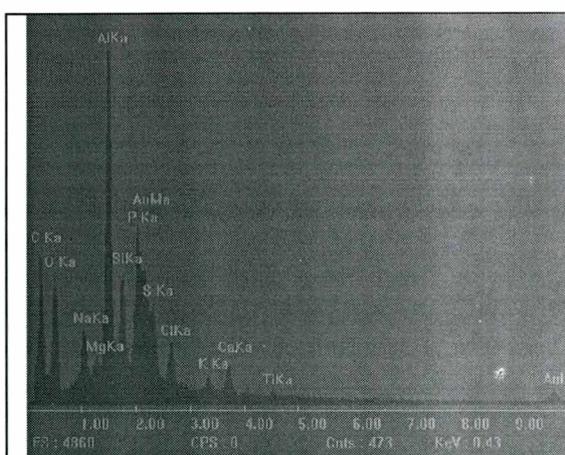


Figura 5.6 - EDAX das partículas Grandes do Lodo

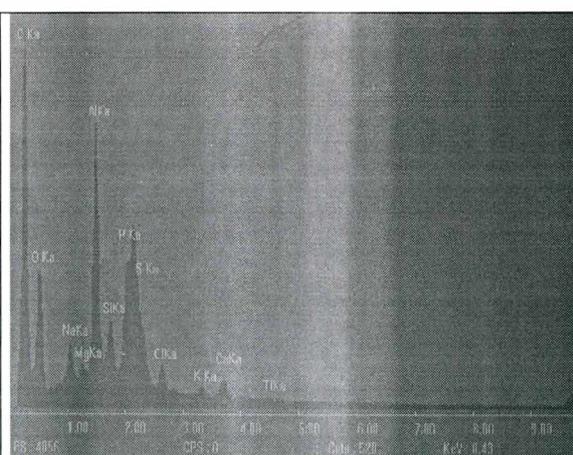


Figura 5.7 - EDAX das partículas pequenas do Lodo

As pequenas partículas do lodo evidenciam a presença do carbono, que pode ser associado à queima dos sólidos voláteis durante o período de secagem do lodo em estufa (pico a 600 graus na ATD). As partículas maiores são associadas à presença do elemento alumínio, devido ao sulfato de alumínio utilizado como floculante no processo de tratamento de efluentes da indústria têxtil.

### 5.1.2 Cinza pesada

Quimicamente a cinza pesada apresenta composição silico-aluminosa (tabela 5.4). Esta cinza pertence a classe F segundo a classificação da ASTM C6118, devido ao percentual de  $\text{SiO}_2 + \text{AL}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$  e ao teor de CaO inferior a 10%. A cinza pesada possui um maior teor de  $\text{SiO}_2$  em detrimento a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{AL}_2\text{O}_3$ , que está relacionado principalmente ao conteúdo de argilo-minerais e quartzo. A alumina ( $\text{AL}_2\text{O}_3$ ) vem em segundo lugar devido ao conteúdo de argilo-minerais. O  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  é o terceiro constituinte em maior quantidade na cinza pesada e está relacionado à presença de sulfeto (pirita e marcasita) nos carvão minerais. Os teores de CaO e MgO estão relacionados à presença de carbonatos. O conteúdo de carbono nas cinzas é evidenciado pelos valor de perda ao fogo.

Tabela 5.4 - Análise química da cinza pesada da termelétrica de Jorge Lacerda.

<b>Componentes</b>	<b>Cinzas pesadas</b>
SiO <sub>2</sub>	55.98
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.8
MnO	0.02
CaO	0.25
MgO	0.59
K <sub>2</sub> O	1.33
Na <sub>2</sub> O	2.59
Cl	0.02
TiO <sub>2</sub>	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.61
CO <sub>2</sub> total	13.99
C orgânico	3.78
S total	0.08
PF	4.61

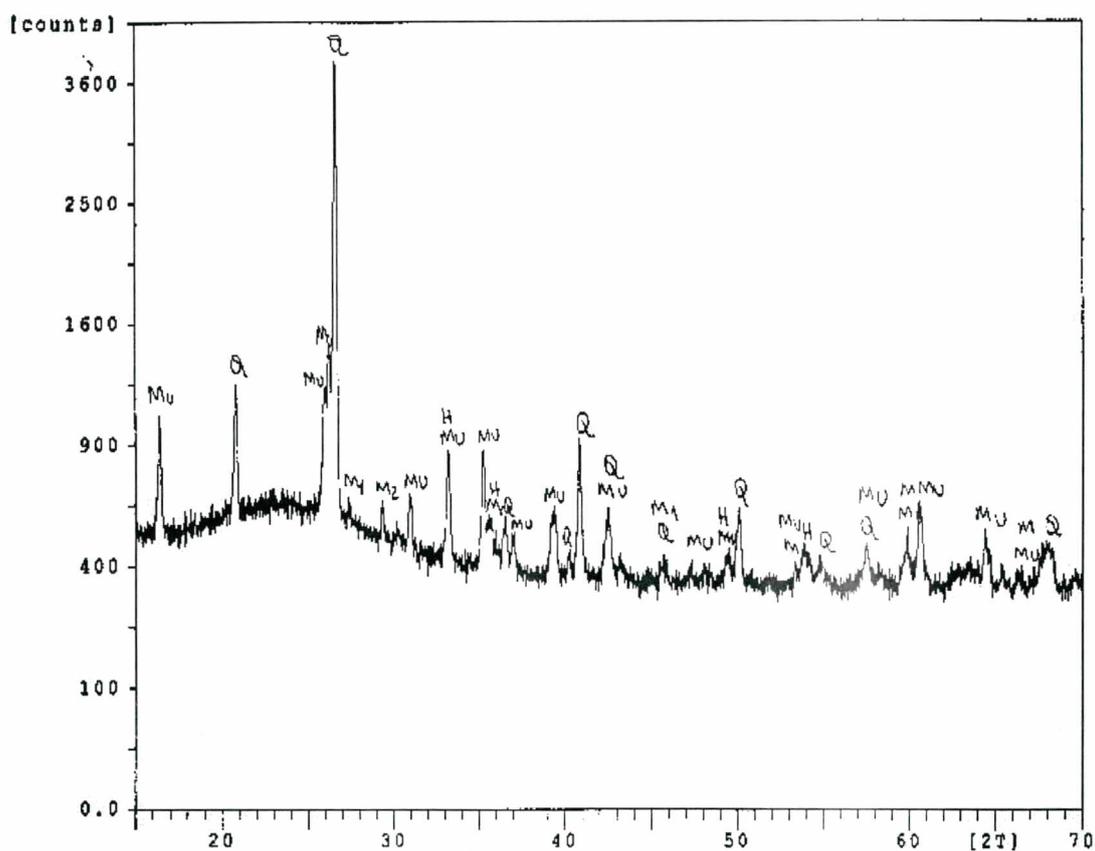
Fonte: Cheriaf e Rocha (1997)

Quanto as características mineralógicas e morfológicas das cinzas, a análise de difração ao raios X (figura 5.8), mostra do ponto de vista mineralógico que as cinzas são constituídas por uma fase vítrea silico-aluminosa, constituindo a maioria dos grãos de cinza e, em segundo por mulita  $2.SiO_2.3.AL_2O_3$ , a hematita  $Fe_2O_3$ , e o periclase MgO. Associada aos grãos de cinzas é comum a ocorrência de, carbono amorfo.

A fase vítrea, de natureza silico-aluminosa, é o constituinte principal dos grãos não opacos de forma arredondada (figuras 5.9 e 5.10) de aspecto esponjoso e esférico. Sua formação está relacionada ao conteúdo de argilo-minerais e as condição de calcinação de carvão. Destaca-se a presença de esferólitos vítreos, que é um parâmetro indicativo de boa qualidade pozolânica de uma cinza.

A mulita forma-se a partir de reações de transformação de caulinita e encontra-se como inclusões na fase vítrea. A sua presença nos esferólitos vítreos caracteriza as cinzas mais reativas formadas em condições de mais alta temperatura. O conteúdo de mulita na cinzas está associado ao teor de caulinita no carvão e às suas condições de calcinação.

O quartzo presente nos carvões minerais, diminui a sua frequência em função da temperatura de calcinação e da finura, participa na formação da fase vítrea e transforma-se parcialmente em cristobalita, em condições particulares de alta temperatura. Ocorre isoladamente como grãos irregulares ou associados à grãos grosseiros como estruturas reliquias do carvão.

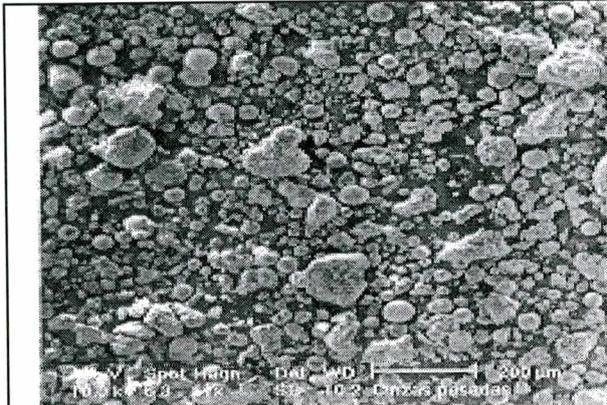


Fonte: Cheriaf e Rocha (1997)

Figura 5.8 - DRX das cinzas pesadas

O carbono nas cinzas apresenta morfologia variada, estando presente na forma de massas irregulares, aglomerados reticulares e esfera. O conteúdo de carbono nas cinzas está relacionado às condições inadequadas de combustão e

preparação do carvão e é mostrado a partir de análises termodiferenciais e termogravimétricas (figura 5.11). Observe-se os picos de 580°C, nos termogramas, mostrando a formação do carbono.



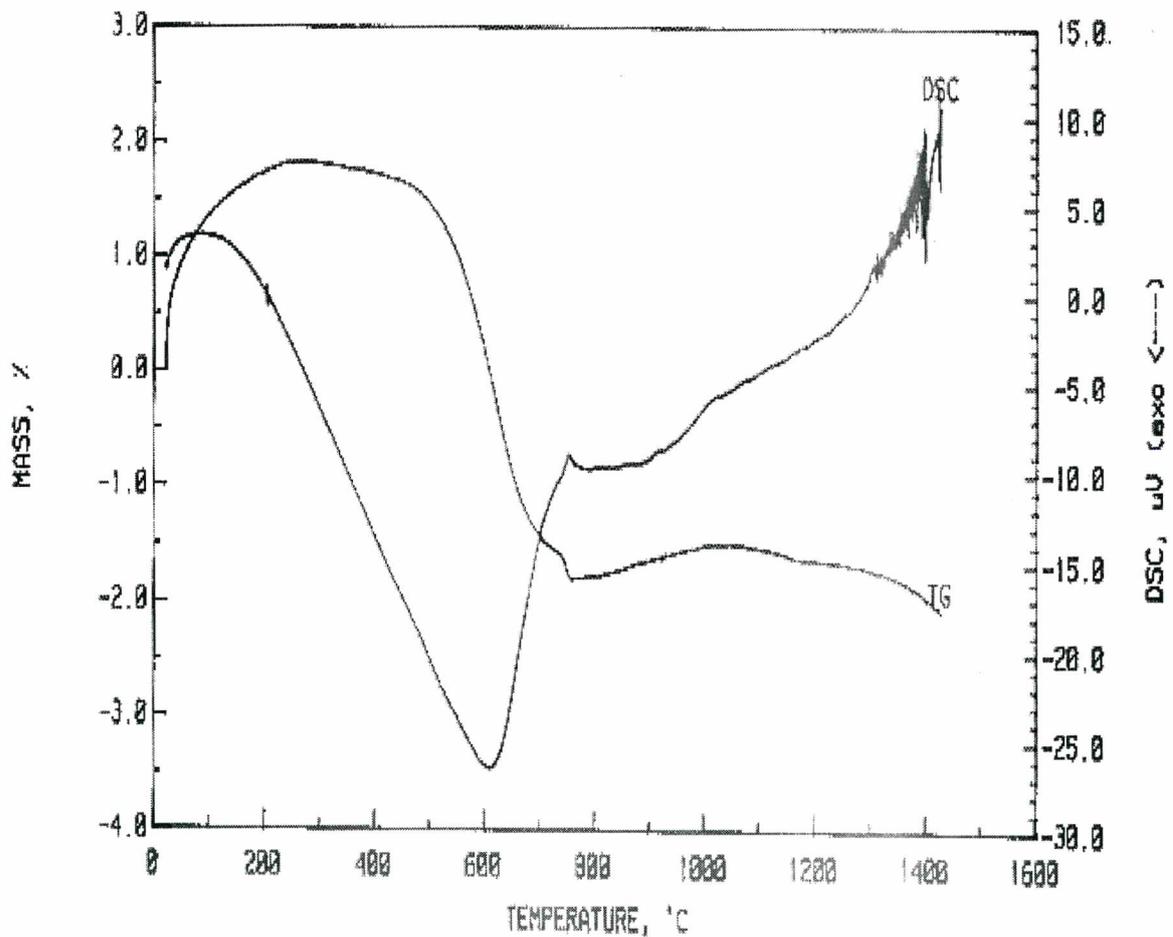
Fonte: Cheriaf e Rocha (1997)

Figura 5.9 - Micrografia eletrônica à varredura das cinzas pesadas



Fonte: Cheriaf e Rocha (1997)

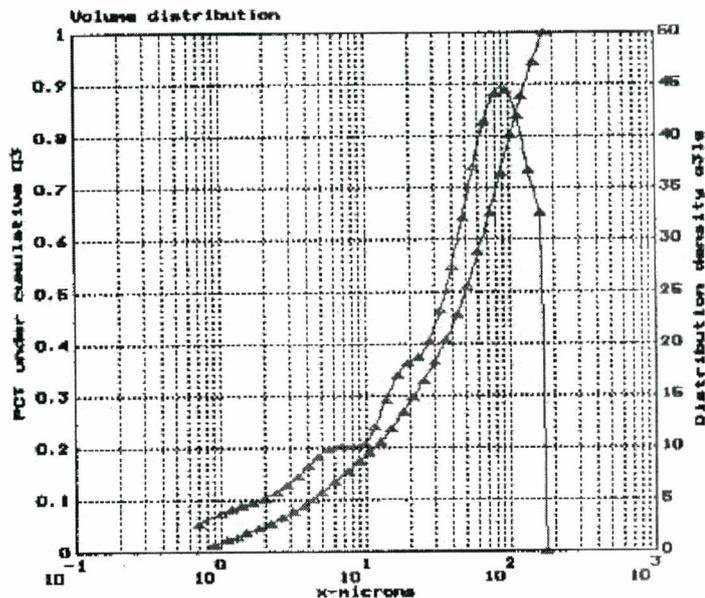
Figura 5.10 - Micrografia eletrônica à varredura das cinzas pesadas.



Fonte: Cheriaf e Rocha (1997)

Figura 5.11 - ATD das cinzas pesadas

A análise granulométrica (figura 5.12) mostra que as dimensões dos grãos estão compreendidas entre 3 e 100 $\mu\text{m}$ , com 15% das cinzas apresentando dimensões inferiores à 10  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Cheriaf e Rocha (1997)

Figura 5.12 - Análise granulométrica das cinzas pesadas

### 5.1.3 Cimento Portland

O cimento conforme análise química apresentada na tabela 5.5, apresenta uma porcentagem de 61% de CaO, 19,31% de SiO<sub>2</sub> e um total de 8% de AlO<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que representa 88% de sua composição, o que é normal no cimento portland tipo I.

Tabela 5.5 – Análise química do cimento

Componentes	Porcentagem (%)
SiO <sub>2</sub>	19.31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.27
CaO	61.36
Na <sub>2</sub> O	0.00
K <sub>2</sub> O	0.57
SO <sub>3</sub>	2.48
PF	2.58

A análise de DRX (em anexo), mostra que as cinzas são constituídas por uma fase vítrea de  $C_3S$ , formando a maioria dos grãos de cimento, e em segundo plano aparece a alúmina e o periclásio.

A microscopia MEV (figura 5.13) do cimento mostra a presença de grão irregulares de tamanho variados que ao contrário das cinzas e lama, parecem sólidos e bastante cristalizados. A sonda EDAX identificou a presença de Si, Al, Ca, Fe, O, Mg e K que fazem parte de sua composição básica, (figura 5.14).

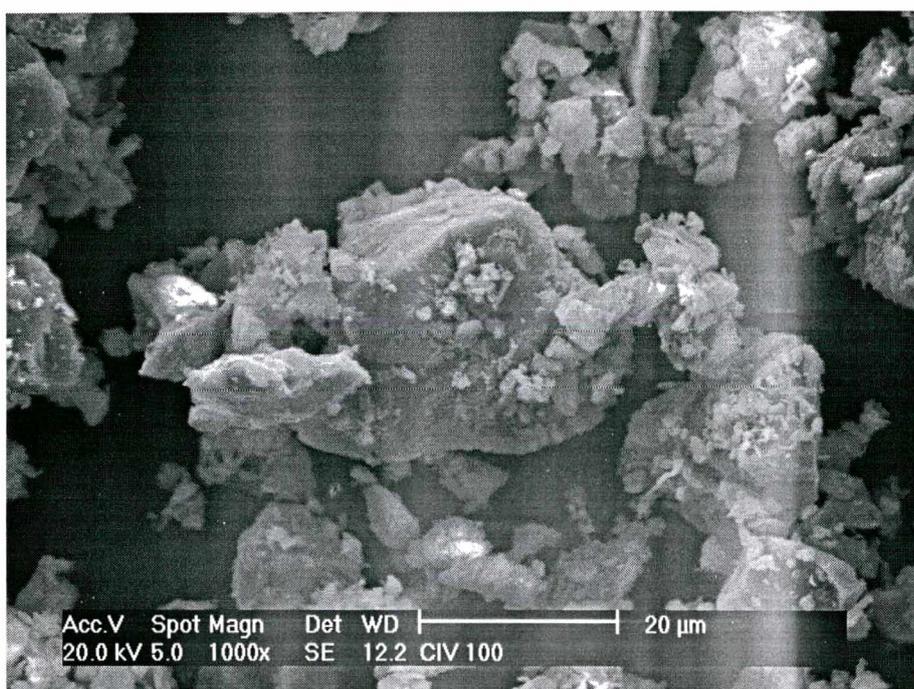


Figura 5.13 - Microscopia MEV do cimento

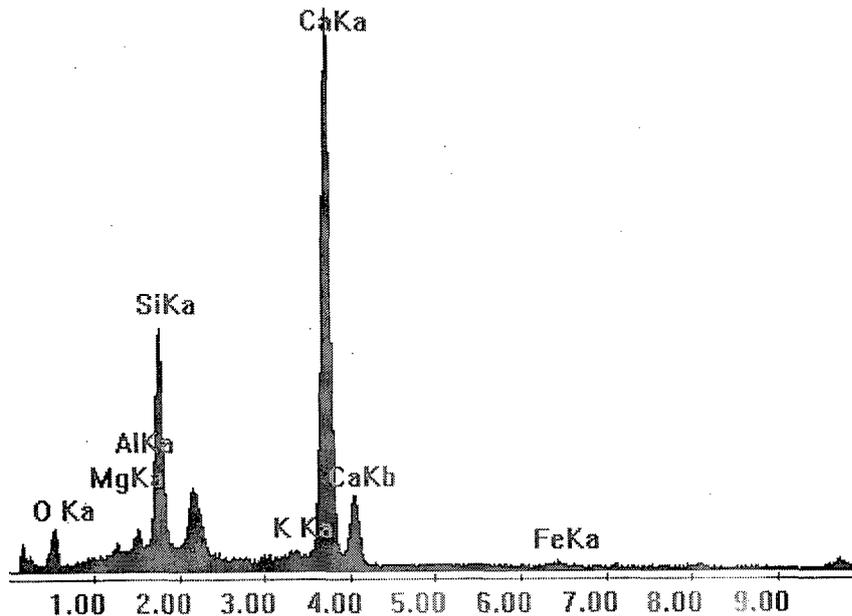


Figura 5.14 - Sonda EDAX

## 5.2 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (RC)

Na avaliação da RC, se analisará a influência das diferentes porcentagens do lodo quanto a variação da RC ao longo do tempo assim como avaliação nos CPs de L/C/C da interferência da cinza pesada, sempre tendo como referência a RC de CP feito com argamassa de cimento e também com as resistências exigidas pela ABNT para a fabricação de alguns materiais de construção que, para facilitar a comparação, foram indicados nos gráficos juntamente com os resultados, assim como a RC da argamassa de referência.

Na análise da RC ao longo dos 90 dias, observou-se nos traços de L/C, que o menor desempenho é obtido nas primeiras idades, em seguida há um aumento após os 28 e 90 dias, (figura 5.15 e tabela 5.6). Pode-se verificar no gráfico da figura 5.14 que aos sete dias a medida que foi acrescentando-se o resíduo têxtil na mistura a RC foi decrescendo, o mesmo não ocorreu nas idades seguintes. Aos 14 dias a RC no traço com 20% de lodo foi maior que com 10% e, aos 28 dias o traço com 30% foi um pouco maior que o com 20%. Então não podemos afirmar que a medida que aumenta-se a quantidade de resíduo à mistura a resistência irá diminuir, outros fatores precisam ser levados em consideração.

Aos 28 dias de idade, as amostras constituídas de 10, 20, 30% de lodo apresentam o mesmo valor, em média de 35 MPa. Aos 90 dias estes mesmos traços apresentam a mesma tendência que a 28 dias, mas com resistência ligeiramente superior que as amostras a 28 dias. Isto mostra que houve uma estabilização da solidificação de lodo com cimento do ponto de vista mecânico.

Tabela 5.6 - Resultados do ensaio de RC dos CPs DE L/C

Idade dias	Cimento	10% lodo	20% lodo	30% lodo	40% lodo
7	44,57	31,59	19,70	5,27	0,93
14	44,27	39,58	41,27	20,72	nd
28	48,14	36,33	31,46	34,02	14,69
90	68,26	37,96	35,48	36,49	17,70

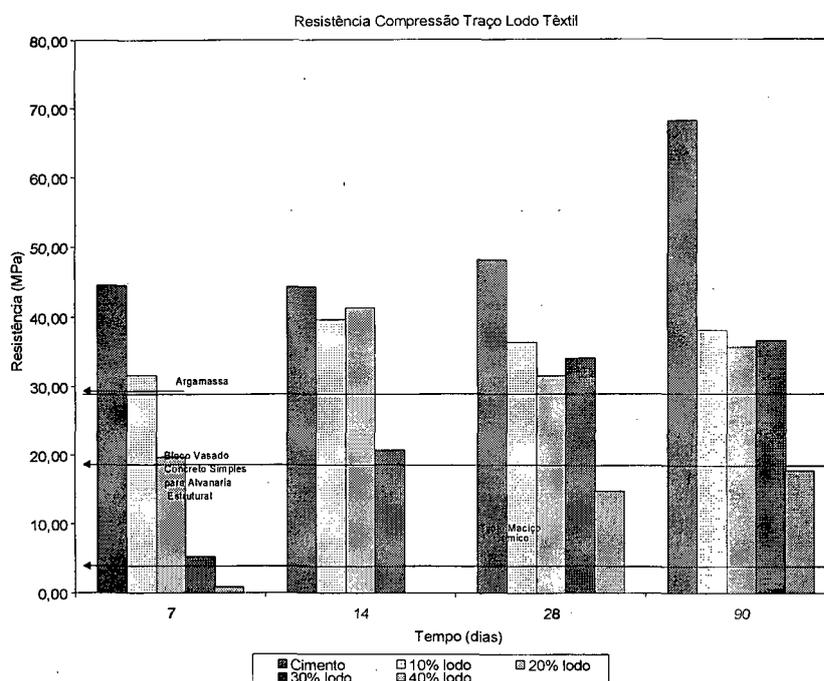


Figura 5.15 - Gráfico da RC/tempo dos traços de L/C.

Com relação a argamassa de referência (amostra de argamassa de cimento no gráfico), pode-se observar que após estabilização aos 90 dias, as amostras de L/C obtiveram uma RC equivalente a 55% do valor da amostra de referência, exceto o traço com 40% que apresentou uma RC 75% inferior a argamassa de

referência. A utilização de 40% de lodo na matriz de cimento conduz a uma redução de cerca de 50% na resistência mecânica em relação as demais porcentagens.

Com estas resistências segundo a normas brasileiras de construção NBR 7170, NBR 6136, poderia-se por exemplo fabricar argamassas, bloco vazado de concreto simples e tijolo maciço, conforme está indicado no gráfico.

Quanto aos resultados dos traços de L/C/C é importante ressaltar antes da discussão dos resultados, como foram escolhidos estes traços, lembrando que, quanto maior for o reaproveitamento de um resíduo ou subproduto maior será a contribuição para a preservação do meio ambiente. Pensando nisto e avaliados os resultados de RC dos CPs de L/C, é que determinou-se a escolha da porcentagem de lodo que iria-se fixar para fazer diferentes traços com a cinza pesada . Pelos resultados obtidos escolheu-se então a porcentagem de 30% sendo que, confeccionou-se também CPs com 40% para compararmos os resultados de traços com mesma porcentagem de cinza e diferentes porcentagens de lodo.

Ao contrário dos traços que não continham cinza pesada todo os traços de L/C/C tanto com 30% como 40% de lodo foram diminuindo a RC com o aumento da quantidade de cinza , isso pode ser observado aos 7, 14, 28 e 90 dias logo, podemos perceber que a introdução de cinza à mistura modificou o comportamento de solidificação como de estabilização.

Igualmente aos traços analisados anteriormente, observa-se na tabela 5.7 e 5.8 e nos gráficos das figuras 5.16 e 5.17, que o menor desempenho é obtido nas primeiras idades e em seguida há um aumento aos 28 e 90 dias.

Tabela 5.7- R/C dos CPs L/C/C com 30% lodo (Mpa)

Dias	CP 3.1	CP 3.2	CP 3.3	CP 3.4	Cimento
7	2,11	1,40	0,79	0,78	44,57
14	19,31	13,05	6,02	1,03	44,27
28	24,23	18,81	14,56	2,47	48,14
90	32,30	20,69	14,54	9,10	68,26

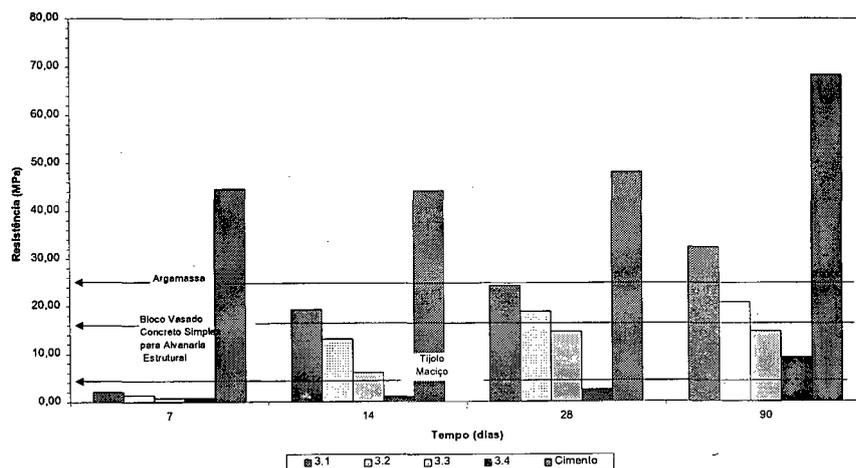


Figura 5.16- RC x tempo dos CPs L/C/C com 30% lodo

Tabela 5.8- RC dos CPs de L/C/C com 40% lodo ( Mpa)

Dias	CP 4.1	CP 4.2	CP 4.3	CP 4.4	Cimento
7	1,99	1,64	0,41	0,37	44,57
14	4,03	2,25	1,09	0,96	44,27
28	9,67	7,01	2,93	1,78	48,14
90	9,58	7,21	5,64	5,75	68,26

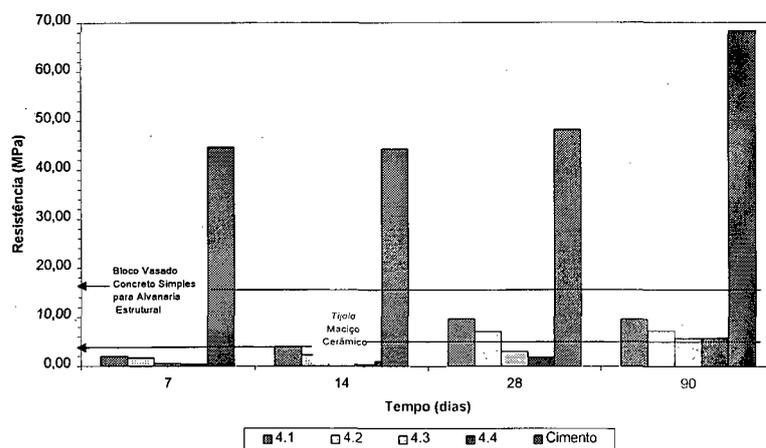


Figura 5.17 - RC x tempo dos CPs de L/C/C com 40% lodo

Nos traços de L/C/C, as resistências foram um pouco inferiores aos de L/C. Porém se fizermos uma análise da quantidade de resíduo adicionada veremos que no traço 31, onde temos 40% de resíduos ( 30% de lodo, 10% cinza), a R/C aos 28

dias foi de 25 Mpa e no traço 40, (que contém 40% de lodo), a resistência foi de 15 Mpa, isto indica que a cinza proporcionou uma reação melhor na mistura.

O acréscimo de 20 % de cinza pesada na mistura de cimento com 30% de lodo, leva a uma redução na resistência após 28 dias de cura, ou seja, cerca de 50% em relação a resistência dos CPs constituídos de cimento e 30% de lodo, porém, se consideramos a cinza pesada e o lodo como um único resíduo, teremos a incorporação de 50% de resíduos no corpo de prova com 50% de cimento e uma resistência de 20Mpa, cujo desempenho é bastante interessante para aplicação na construção civil.

Todas as resistências adquiridas aos 28 dias permitem a aplicação dos traços para diferentes finalidades. Pode-se observar nos gráficos de RC que para tijolo maciço, os valores mínimos de resistência varia de 1,5 a 4,0MPa, dependendo da classe segundo a NBR 7170, bloco vazado de concreto simples para alvenaria sem função estrutural devem apresentar em média 2,5 MPa (NBR 6136) e para alvenaria estrutural de 4,5 a 16,0 MPa (NBR 6136) . Segundo dados expostos nas tabelas os resultados de RC variam de 4 a 25MPa aos 28 dias.

### **5.3 ANÁLISE DOS ELEMENTOS QUE SOLUBILIZARAM NA ÁGUA DE CURA**

A análise dos elementos solubilizados das misturas será comparada com a solubilização dos elementos do CP de referência, com a água da torneira e do resultado da análise do lixiviado do lodo (conforme tabela 5.9 abaixo), afim de que se possa verificar se os elementos químicos fixaram dentro da matriz ou solubilizaram para o meio externo. Também se verificará a adsorção dos metais pela cinza pesada, comparando os resultados entre os CPs de L/C/C E L/C.

A intenção de analisar estes resultados foi a de verificar como se comportariam materiais de construção fabricados com adição de resíduos e submetidos a um contato constante com a água conforme descrição do ensaio. Para uma interpretação mais realista, submeteu-se também ao mesmo ensaio um CP de

argamassa de cimento (cimento + água) o qual, representa um material de construção fabricado somente com cimento, sem adição de resíduo.

Desta maneira podemos supor que, se a quantidade de elementos solubilizados na água de cura for igual a da amostra de referência o comportamento quanto a solubilização está ocorrendo igual ao que acontece naturalmente na realidade com os materiais fabricados com argamassa de cimento, ou seja, a razão entre a concentração na água de cura de determinado elemento num CP contendo resíduo e a concentração no CP com argamassa de cimento -  $(C_{\text{traço}} / C_{\text{cim}})$  for igual a 1(um).

Se a razão for maior que 1 pode-se dizer que o comportamento foi diferente, houve uma liberação de além daquela que ocorre naturalmente com os materiais fabricados com argamassa de cimento. Já se a razão for menor que 1 pode-se observar que houve uma fixação dos elementos na matriz inclusive a parte que confere ao cimento, supondo-se que os elementos reagiram quimicamente entre si, ocorrendo não só a solidificação conferida no ensaio de RC como a estabilização química.

### 5.3.1 Interpretação

Conforme resultados da concentração dos elementos na tabela 5.9 abaixo, o cloreto manteve sempre a mesma concentração de 4mg/L que corresponde a concentração inicial ( $C_0$ ) da água, indicando que os 53mg/L de  $\text{Cl}^-$  encontrada no lixiviado do lodo, não solubilizaram para água ficaram dentro do corpo de prova, isto pode ser observado também no caso do Mg, K,  $\text{SO}_4$ , Ca. No caso  $\text{NH}_4$  e Na, foi liberado uma porcentagem de resíduo, porém pequena, se compararmos a concentração deste elemento no lixiviado do lodo.

Tabela 5.9 - Concentração dos elementos químicos

Elementos	Concentração na água de cura dos traços aos 28 dias (mg/l)				Concentração inicial (Co) (mg/l)	Lixiviação (mg/l)
	31	33	30	Cimento	Água	Lodo
<b>Cl</b>	4	4	4	4	4	53
<b>Mg</b>	0,3	0,5	0,3	0,7	0,1	16
<b>K</b>	7	3	6	6	1	20
<b>NH<sub>4</sub></b>	3	2	3	0,2	0,1	135
<b>Na</b>	5	4	5	3	3	95
<b>SO<sub>4</sub></b>	6	7	6	7	5	5
<b>Ca</b>	15	19	13	21	5	101
Elementos	Concentração na água de cura dos traços aos 14 dias (mg/l)				Concentração inicial (mg/l)	Lixiviação (mg/l)
	31	33	30	Cimento	Água	Lodo
<b>Cl</b>	3,9	4,4	3,6	3,6	4	53
<b>Mg</b>	0,3	0,3	0,2	0,5	0,1	16
<b>K</b>	14,6	8,2	17,6	11,9	1	20
<b>NH<sub>4</sub></b>	5,5	4,0	5,0	0,2	0,07	135
<b>Na</b>	8,8	6,6	9,5	4,3	3	95
<b>SO<sub>4</sub></b>	3,9	3,9	4,0	4,1	5	5
<b>Ca</b>	20,8	15,7	8,5	12,3	5	101
Elementos	Concentração na água de cura dos traços aos 7 dias (mg/l)				Concentração inicial (mg/l)	Lixiviação (mg/l)
	31	33	30	Cimento	Água	Lodo
<b>Cl</b>	3,5	4,2	3,8	4,2	4	53
<b>Mg</b>	0,3	0,5	0,3	0,7	0,1	16
<b>K</b>	7,5	2,8	6,4	6,3	1	20
<b>NH<sub>4</sub></b>	2,9	2,1	2,8	0,2	0,1	135
<b>Na</b>	5,4	3,5	4,7	3,4	3	95
<b>SO<sub>4</sub></b>	6,1	6,7	6,3	6,9	5	5
<b>Ca</b>	14,5	19,4	13,4	20,8	5	101

De acordo com o gráfico de relações do K, Cl<sup>-</sup> e Na (figura 4.18, 4.19 e 4.20), o comportamento destes elementos são semelhantes. Eles foram se estabilizando com o passar do tempo. Inicialmente, até os 7 dias, houve uma liberação justificada pelo início de pega. O CP nessa fase está passando por um processo de hidratação do cimento portanto o mesmo não se encontra completamente estabilizado. Após os 14 dias pode-se notar uma rápida estabilização. A razão a partir deste ponto é praticamente igual a 1, logo os elementos do resíduo se fixaram na matriz.

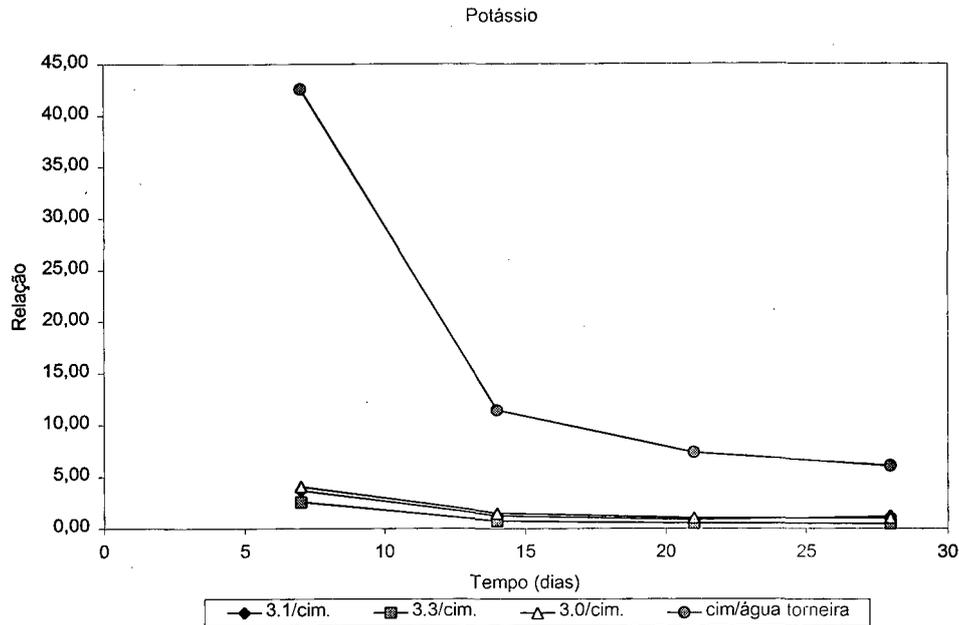


Figura 5.18 - Gráfico da razão -  $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento K

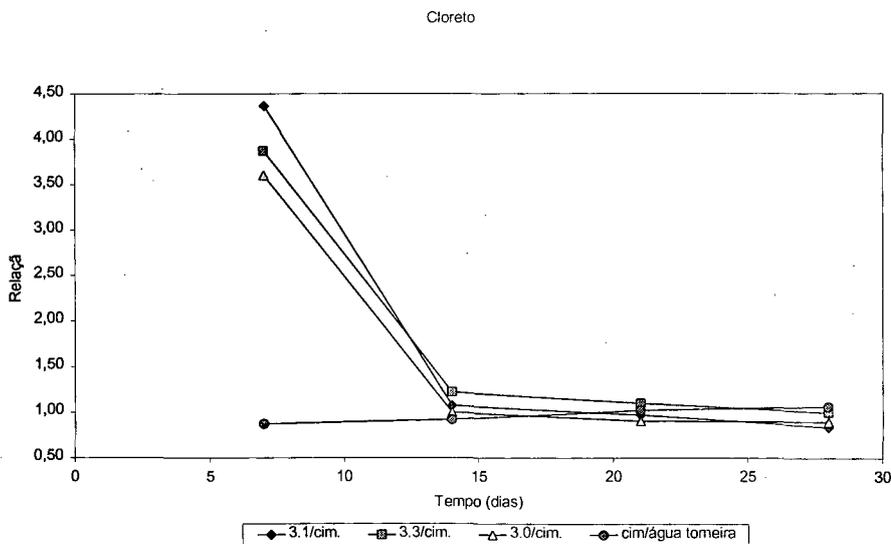


Figura 5.19 - Gráfico da razão -  $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento Cl<sup>-</sup>

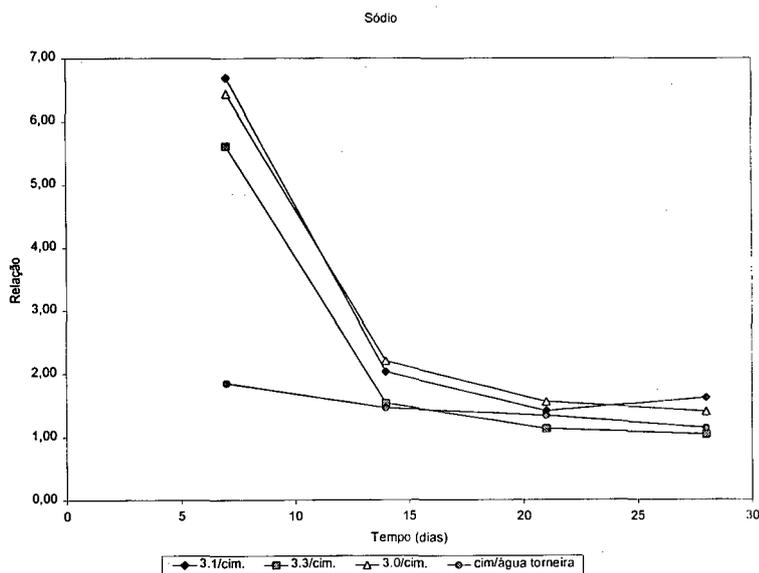


Figura 5.20 - Gráfico da razão -  $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento Na

Pode-se observar que no gráfico do Mg (figura 21), a relação em todos os traços, e do início ao fim do tempo, foi menor que 1. O Mg reagiu completamente inclusive a porcentagem que cabe ao cimento. Isto também acontece após os 21 dias para o Ca e  $\text{SO}_4$  (figura 22 e 23).

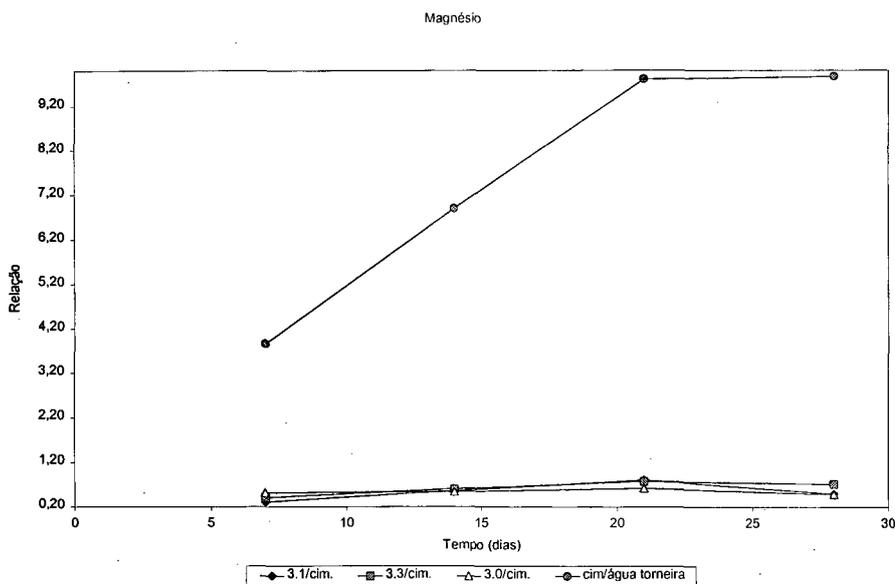


Figura 5.21 - Gráfico da razão -  $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento Mg

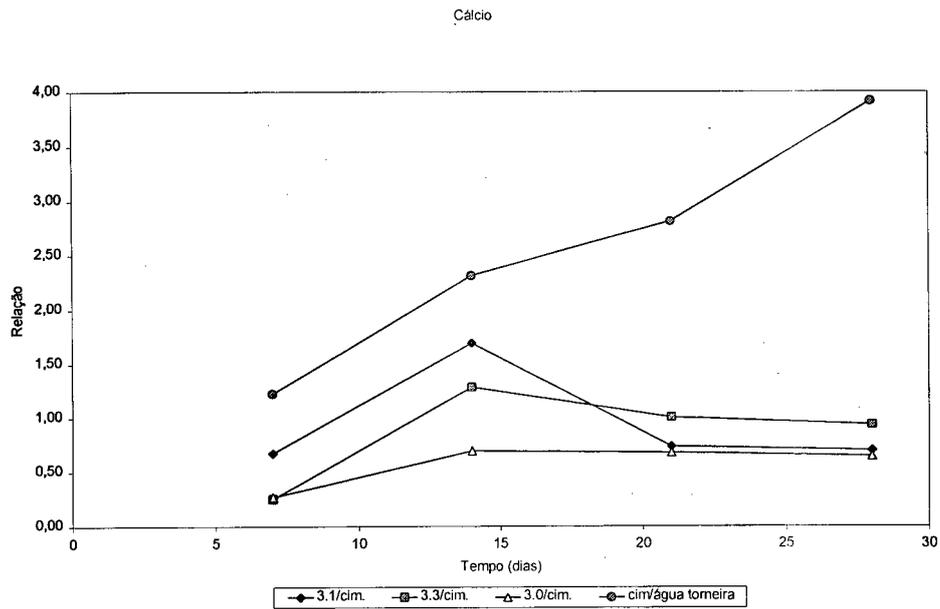


Figura 5.22 - Gráfico da razão -  $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento Ca

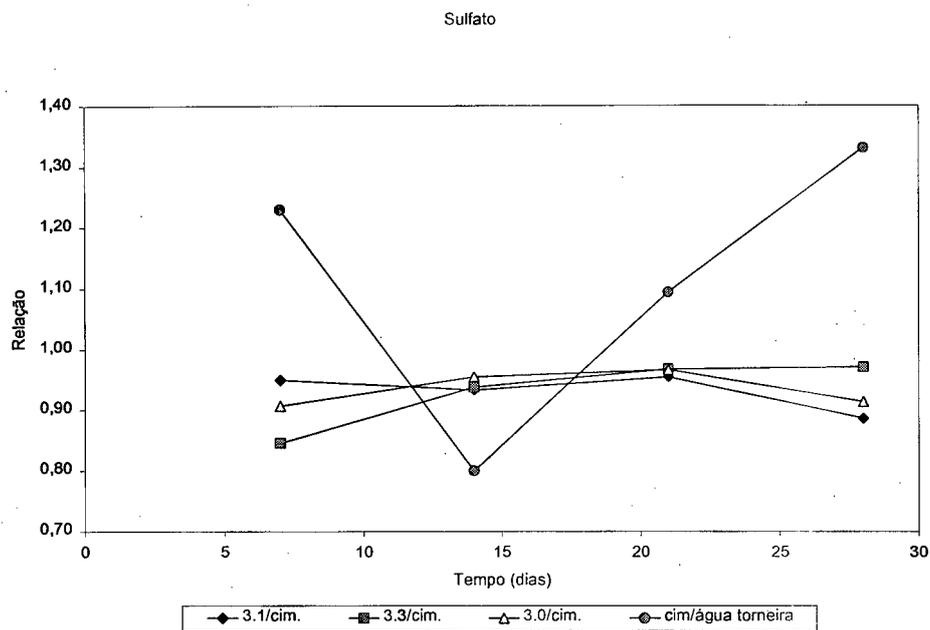


Figura 5.23 - Gráfico da razão -  $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento  $\text{SO}_4$

O único elemento que resultou em valores maior do que 1 foi a  $\text{NH}_4$  (figura 24), mesmo após aos 28 dias. Provavelmente a liberação deste elemento está relacionada a exalação de forte odor observado nos CPs antes da sua estabilização, a qual foi comentada na caracterização do lodo in natura. Observou-se que aos 90 dias o odor havia reduzido consideravelmente.

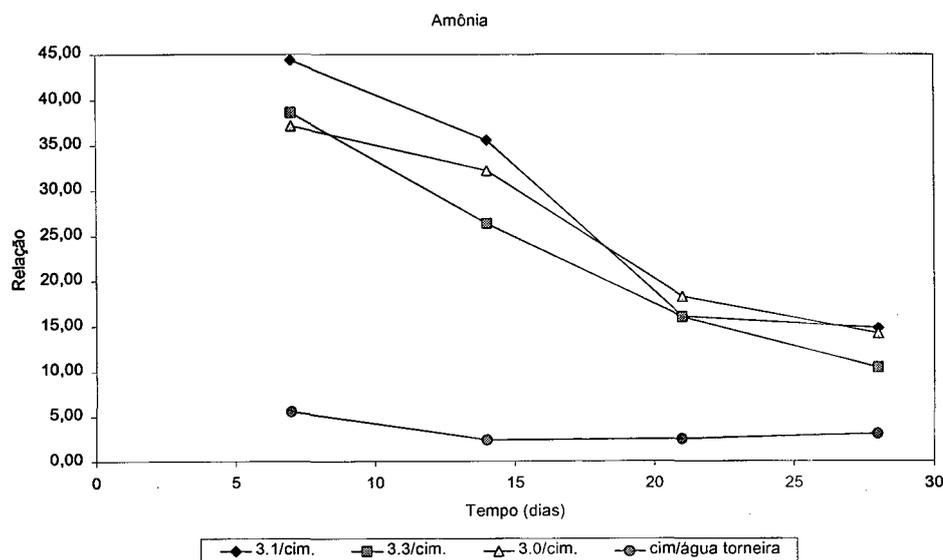


Figura 5.24 - Gráfico da razão -  $C_{\text{traço}}/C_{\text{cim}}$ , do elemento  $\text{NH}_4$

Como foi visto na revisão bibliográfica, a  $\text{NH}_4$ ,  $\text{SO}_4$ , Na e Ca, sobre determinadas condições interferem na pega do cimento e por sua vez na RC. O que observou-se é que no ensaio de RC, com relação ao CP de referência, as RCs são menores e, entre os fatores que interfiram nesta diminuição, provavelmente, estão a presença destes elementos nas mistura (tabela 5.9).

Na tabela 5.9, comparando-se os resultados dos CPs de L/C e L/C/C aos 28 dias, pode-se verificar que, a cinza não interferiu na liberação nem na absorção do  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4$ . Interferiu na liberação do Mg e Ca, aumentando a concentração e auxiliou na absorção de K, Na e  $\text{NH}_4$ .

#### 5.4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO pH x TEMPO NA ÁGUA DE CURA

De acordo com os gráficos da variação do pH ao longo do tempo (figura 5.25, 5.26 e 5.27, abaixo), pode-se dizer que aos 28 dias o pH dos traços de L/C se estabilizou na faixa de 10 a 11. Nesta idade também foi constatado o começo da estabilização RC que se estendeu até os 90 dias e também da maioria dos elementos na análise da água de cura.

Nos traços de L/C/C, o pH não estabilizou na mesma velocidade que nos CPs de L/C, foi diminuindo gradativamente ao longo do tempo. Aos 90 dias se

encontravam na faixa de 9 a 10. Da mesma forma isto foi constatado na RC, que foi aumentando, ao contrário da RC dos CPs L/C que estabilizou entre 28 e 90 dias.

Devido ao pH da matriz, formaram provavelmente hidróxidos e carbonatos insolúveis conforme foi comentado na revisão bibliográfica. A dissolução foi maior nos primeiros dias, pois os CPs não estavam totalmente curados.

Ao longo do tempo a velocidade das reações vai diminuindo pois, conforme pode se verificar nos gráficos, aos 28 dias nos CPs de L/C/C, o pH vai decrescendo lentamente, que representa a gradativa estabilização dos elementos. Isto já não ocorre nos CPs de L/C. Entre 25 e 30 dias Já pode-se observar a constância do pH, ou seja, a estabilização química. Em linhas gerais todos os CPs comportaram-se de forma semelhante quanto a variação do pH ao longo do tempo

Conforme visto na revisão bibliográfica, a lixiviabilidade de produtos estabilizados com cimento é fortemente influenciada pela alcalinidade da matriz e, a maioria dos íons tem lixiviação mínima na faixa de pH 7 a 10, SLOOT (1991). Como o pH na água de cura dos CPs de L/C/C tenderam para está faixa de pH ( 9 a10), provavelmente este foi um dos fatores que contribuíram para a retenção dos elementos químicos como foi verificada nas análises da água de cura.

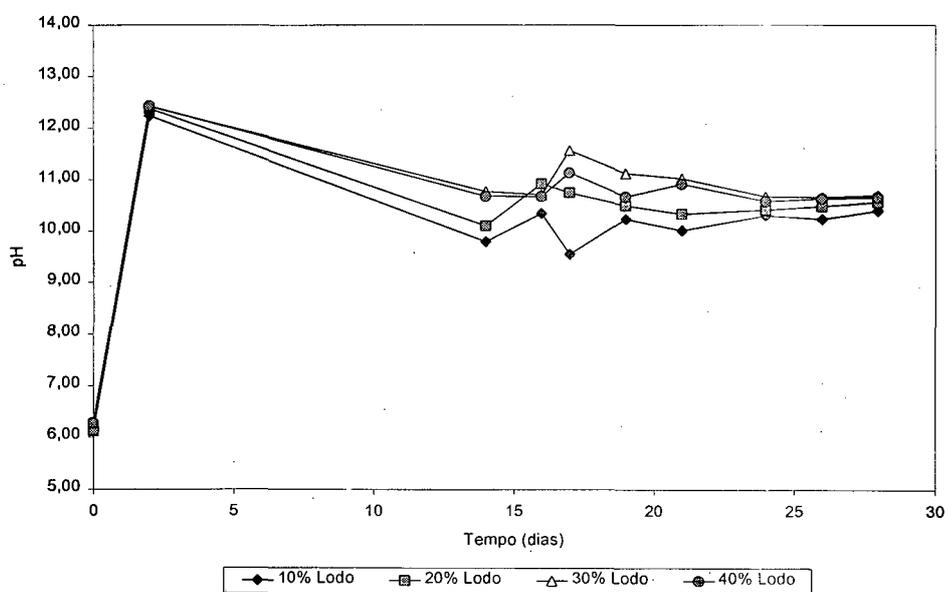
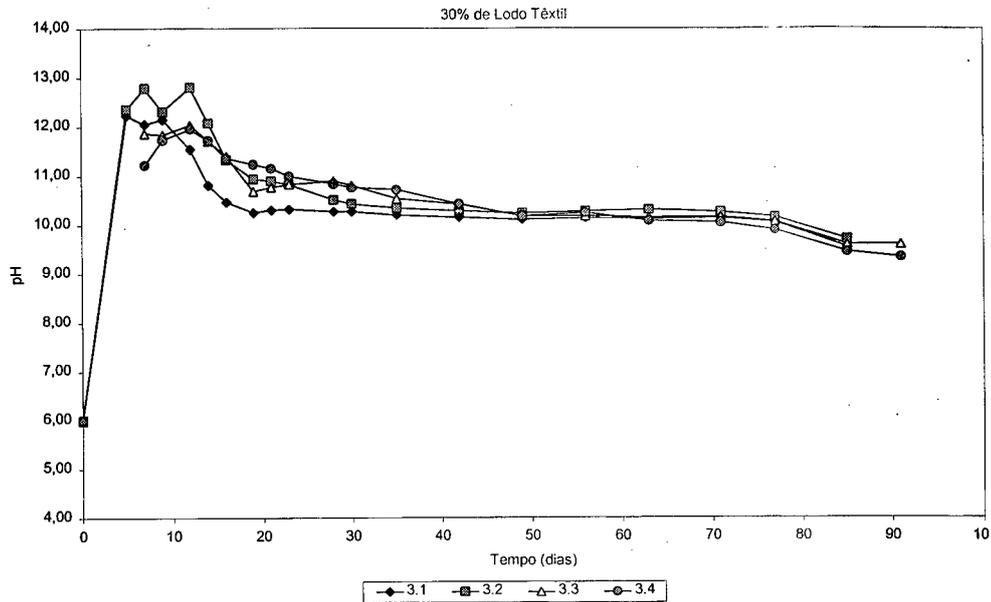


Figura 5.25 - Gráfico do pH x tempo do traços de L/C.



5.26 - Gráfico do pH x tempo dos traços L/C/C com 30% de lodo

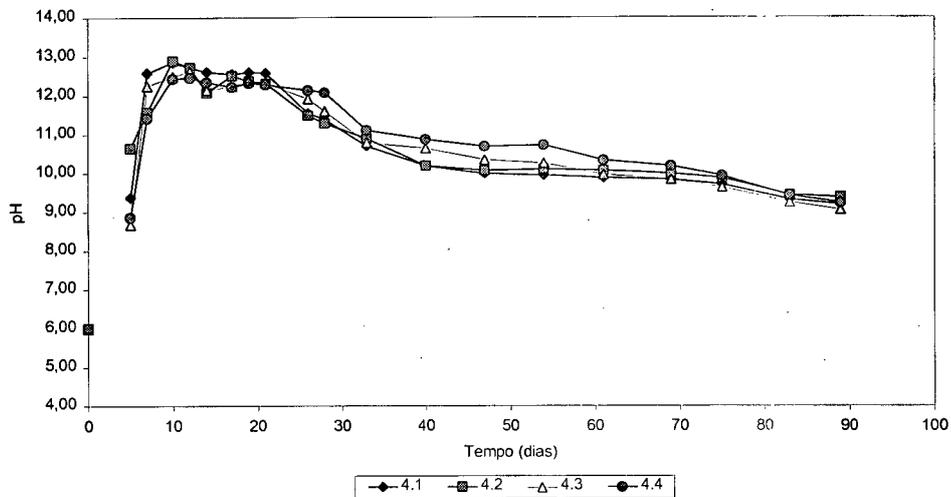


Figura 5.27 - Gráfico do pH x tempo dos traços de L/C/C com 40% de lodo

## 5.5 LIXIVIAÇÃO E COT

Os resultados da lixiviação e solubilização aos 7 dias serão comparados com a listagem 7 e 8 da NBR 10004 - Classificação de resíduos, a fim de verificar, conforme a norma brasileira, se em condições extremas (estratificação dos CPs, passando em peneira de 9,5mm, em contato com água, sob agitação constante por 24 hs, à pH 5,0), se encontram elementos no lixiviado acima do permitido pela norma.

A análise de COT no lixiviado dos CPs foi verificada a fim de determinar a concentração de sólidos voláteis que se dissolveram podendo desta forma verificar a quantidade de matéria orgânica que ficou retida nos CPs.

É importante lembrar que, do ponto de vista da construção civil o ensaio de lixiviação prescrito na NBR 10004, não representa na realidade a solubilização de elementos químicos dos materiais de construção para o meio externo. Normalmente o que acontece com um material de construção quando em uso é a solubilização de pelo contato com a água da chuva, de enchente do mar. O ensaio de lixiviação representa uma situação mais agressiva. Do ponto de vista ambiental simula as condições inadequadas mais comuns de deposição onde os resíduos são colocados em contato com resíduos orgânicos em lixões.

#### 5.5.1 - Interpretação

Pelos resultados expostos na tabela 5.10 pode-se observar que nenhum dos elementos ultrapassaram aos limites exigidos pelas normas brasileiras. Conforme a ABNT estes materiais seriam considerados inertes, pelo menos para os elementos analisados, é claro que para classificá-lo efetivamente seria necessário outras análises. Pode-se observar que houve um aumento na concentração de K, Mg, Ca e Fe nos traços nos traços de L/C/C em relação ao CPs de L/C. Não houve liberação de metais pesadas como Pb, Cr, Cd.

Tabela 5.10: Concentração dos elementos químicos no lixiviado

Elemento	Amostras			NBR 10004	
	Com 30% lodo têxtil			LIST. 7 Lixivia.	LIST. 8 Solubiliz.
	30%cinz.	10%cinz.	s/ cinza		
Sódio	12,200	10,170	12,520		200,000
Amônia	1,950	2,170	3,440		
Potássio	52,600	53,590	30,060		
Magnésio	0,300	0,210	0,190		
Cálcio	3233,900	2437,610	2331,160		
Cloreto	N.D.*	N.D.*	N.D.*		250,000
Nitrato	N.D.*	N.D.*	N.D.*		10,000
Fosfato	N.D.*	N.D.*	N.D.*		

Sulfato	5,600	48,700	13,530		400,000
Chumbo	N.D.**	N.D.**	N.D.**	5,000	0,050
Cromo tot.	N.D.**	N.D.**	N.D.**	5,000	0,050
Cádmio	0,018	N.D.**	N.D.**	0,500	0,005
Alumínio	0,520	0,120	0,330		0,200
Ferro	0,271	0,526	0,189		0,300

N.D.\* - não detectável a nível de 0,001mg/L

N.D.\*\* - não detectável a nível de : Pb - 0,03 mg/mL; Cr - 0,015mg/mL; Cd - 0,001mg/mL; Al - 0,10 mg/mL;  
Fe- 0,007mg/MI

Quanto aos resultados do COT, apresentados na tabela 5.11, observa-se que uma pequena percentagem, de matéria orgânica dissolveu na água. Podendo-se supor que fixou-se na matriz.

Tabela 5.11: % do COT dissolvido no lixiviado

Amostra	COT (mg/L)	COT %
Lama	69,37	1,38
30	110	2,20
31	101,56	2,03
33	87,5	1,75

Como os sólidos voláteis representam a fração orgânica de um material podemos dizer que dos 8% de matéria orgânica encontrado no lodo in natura, em média 6% fixaram-se na matriz.

De acordo com a revisão bibliográfica, compostos orgânicos influenciam na cura da argamassa. Os dois principais fatores intervenientes são a adsorção de moléculas orgânicas por partículas constituintes da estrutura cristalina, bloqueando as reações de hidratação, e a complexação destes compostos entre si, e com os íons de cálcio, alumínio e ferro, mantendo-os em solução, impedindo a formação dos compostos hidratados formadores de estrutura cristalina. Logo supõe-se que um dos fatores que devem ter influenciado no decréscimo da RC das CPs em relação a amostra de referência é a presença de matéria orgânica.

## **CAPÍTULO**

# **6**

### **CONCLUSÃO**

Os resultados apresentados mostram que nos processos de solidificação de resíduos tóxicos têxteis com cimento, do ponto de vista mecânico, podemos obter resistências apreciáveis, na ordem de 30 MPa para uma mistura constituída de 30% de lodo com cimento e da ordem de 20 MPa para misturas com 20% de cinza pesada , 30% de lodo e cimento. Estes desempenhos são bastantes interessantes para a aplicação na construção civil, mesmo que os elementos fixados representem uma ameaça ao ataque das propriedades do cimento endurecido. Prova disto são os valores de resistência aos 90 dias semelhantes e até maiores que aos 28 dias. Ainda, de um modo geral, as resistências obtidas entre todos os traços, ficaram entre 4 e 30Mpa aos 28 dias, podendo ser aplicada para diferentes tipos de materiais de construção.

A RC, os resultados do teste de solubilização, lixiviação, pH e demais análises sugerem que o produto resultante deste tratamento pode ser considerado para o uso de material de construção secundário. Porém, uma evolução adicional das propriedades, tais como, força, durabilidade, resistência ao sulfato, ciclos descongelamento/congelamento, úmido/seco, e mudanças nos volumes da argamassa, estudadas sobre longo período de tempo, é necessário antes que uma recomendação conclusiva possa ser feita sobre o uso desta argamassa para propósitos da construção

O ensaio de solubilização na água de cura, mostrou que ambientalmente não se tem solubilização significativa dos metais analisados, comparado à solubilização da água da torneira, da amostra de referência e principalmente com os resultados do ensaio de lixiviação conforme NBR 10005, que é um ensaio mais

agressivo, simulando as condições extremas. Obteve-se diferenças de solubilização significativas representando que os elementos ficaram retidos na matriz solidificada. Assim tudo indica que este processo pode ser ambientalmente seguro.

No entanto para a utilização de lodo têxtil e cinza pesada em materiais de construção é necessário um controle da liberação de contaminantes para o meio. Uma predição dos impactos ambientais requer conhecimentos dos mecanismos de lixiviação e das condições que o material vai ser exposto durante sua vida útil. A caracterização de um material residual vai depender principalmente da aplicação que se deseja dar, ou da forma que este vai ser disposto. Deve-se utilizar testes que com menor custo e tempo, obtenha-se o maior número de informações.

Pode-se dizer que os objetivos do trabalho foram alcançados. Este estudo é um interessante caminho a ser seguido pela indústrias que estão preocupadas em dar um destino mais adequado aos seus resíduos industriais, pois ao reaproveitarem seus resíduos estarão sobretudo diminuindo impactos ambientais que os resíduos possam causar.

Com este trabalho procurou-se acima de tudo trazer uma alternativa para solucionar problemas ambientais decorrentes de deposição inadequado de lodo têxtil e cinza pesada inovando em tecnologia de reaproveitamento de resíduos como material de construção.

## **6.1- RECOMENDAÇÕES**

Como recomendações para trabalhos futuros sobre a solidificação de lodo têxtil com cimento são apresentadas as seguintes propostas:

- ⇒ Estudar a questão do odor liberado pelo material, provocado provavelmente pela amônia.
  
- ⇒ Verificar a questão da cor. O lodo apresenta cor escura devido a mistura de vários corantes. Os CPs de L/C ficaram com um tom cinza escuro, e os CPs moldados com cinza, ficaram um pouco mais claro. Poderia-se adicionar

pigmentos à mistura modificando assim a cor do produto tornando-o mais atraente ao consumidor.

- ⇒ Avaliar o custo final do produto, comparando com o preço dos produtos convencionais para verificar sua viabilidade econômica.
- ⇒ Desenvolver um produto e fazer um acompanhamento da durabilidade do mesmo ao longo do tempo.

# **CAPÍTULO**

# **7**

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1- ALLEMAN, J. E., BERMAN, N. A. **Constructive sludge management: biobrick.** Journal of Environmental Engineering, ASCE, 110(2), 301-311.1984.
- 2- ALVES, José D., **Manual de tecnologia do concreto.** GOIÂNIA, Universidade Federal de Goiânia , 1992.
- 3- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, **Propriedades do concreto endurecido - Especificações técnicas, ET 61,** São Paulo, 1991.
- 4- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT, **Resíduos sólidos – classificação – NBR 10004 / 1987,** Rio de Janeiro, 1987.
- 5- \_\_\_\_\_, **Cimento Portland - Determinação de resistência à compressão: NBR 7215.** Rio de Janeiro, 1982. 15p.
- 6- **Argamassa industrializada para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Especificação - NBR 13281,** Fevereiro, 1995, 2p.
- 7- **Bloco cerâmico para alvenaria – Especificação- NBR 7171,** Junho, 1983, 11p.
- 8- **Bloco cerâmico para alvenaria - formas e dimensões – Padronização - NBR 8042,** Junho, 1983, 4p.
- 9- **Bloco cerâmico para alvenaria - verificação da resistência à compressão - Método de ensaio - NBR 6461,** Junho, 1983, 3p.
- 10- **Bloco cerâmico portante para alvenaria - Determinação da área líquida - Método de ensaio - NBR 8043,** Junho, 1983, 2p.
- 11- **Execução de alvenaria sem função estrutural de tijolos e blocos cerâmicos – Procedimento - NBR 8545,** Julho, 1984, 13p.
- 12- **Paredes de alvenaria estrutural - ensaio à compressão simples - Método de ensaio- NBR 8949,** Junho, 1985, 7p.

- 13- **Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Classificação - NBR 13530**, Novembro, 1995, 2p.
- 14- **Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Especificação -NBR 7170**, Junho, 1983, 6p.
- 15- **Tijolo maciço cerâmico para alvenaria - forma e dimensões – Padronização- NBR 8041**, Junho, 1983, 2p.
- 16- **Tijolo maciço cerâmico para alvenaria - verificação da resistência à compressão - Método de ensaio- NBR 6460**, Junho, 1983, 3p.
- 17- \_\_\_\_\_., **Lixiviação de resíduos – procedimento – NBR 10005 / 1987**, Rio de Janeiro,1987.
- 18- \_\_\_\_\_., **Solubilização de resíduos – procedimento – NBR 10006 / 1987**, Rio de Janeiro,1987.
- 19- \_\_\_\_\_., **Amostragem de resíduos – procedimento – NBR 10007 / 1987**, Rio de Janeiro,1987.
- 20-BATCHELOR, Bill. **A Numerical leaching model for solidified/stabilized wastes. water science technology**, Great Britain, vol, 26, n° 1-2, pp. 107-115, 1992.
- 21-BERNARDES JUNIOR., C. et al. **Classificação dos resíduos sólidos industriais**. São Paulo: CETESB, 1983.
- 22-BRAILE, P. M., et al. **Manual de tratamento de águas residuárias e industriais**. CETESB, 1979.
- 23-GONÇALVES, Maria de F. F. **Caracterização e estudos de tratabilidade pelas vias físico-química e biológica aeróbia dos efluentes líquidos das lavanderias industriais de Colatina (ES)**.Espírito Santo: UFES, 1996, 134p., Dissertação ( mestrado)- Universidade Federal do Espírito Santo, 1996.
- 24-CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL **Tecnologia de controle da Indústria têxtil**, nota técnica: NT – 22. São Paulo; Julho de 1991.
- 25- \_\_\_\_\_., **Tratamento de águas residuárias das industrias têxteis**. São Paulo;1993. 12 pag. ( Apostila-síntese do curso realizado na CETESB-SEDE no período de 21 á 25 de junho de 1993 ).
- 26- \_\_\_\_\_., **Resíduos sólidos industriais..** São Paulo: ASCETESB, 1985. Série ATAS da CETESB, volume 1, pag. 32 a 43.

- 27-CHAMIE, Sérgio L., **Encapsulamento de resíduos de lamas galvânicas através da solidificação em matrizes de cimento**. São Paulo: EPUSP, 1994. 246p. Dissertação. (Mestrado em engenharia ) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994.-
- 28-CHERIAF, M., ROCHA, J.C. **Reaproveitamento de Cinzas Pesadas de Centrais Termoelétrica como novos materiais de construção civil**. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 1<sup>o</sup>, 1997, Canela- RS, Anais do I Encontro Nacional Sobre Edificações E Comunidades Sustentáveis.
- 29-CINCOTTO, M.A., KAUPATEZ, R.M.Z., **Seleção de materiais quanto a atividade pozolânica: tecnologia das edificações**. Pini, São Paulo, 1988
- 30-CLÁUDIO, Jair R. **Resíduos sólidos perigosos, solidificação de lamas galvânicas com cimentos**. São Paulo, princeps, 1987 (Dissertação apresentada à EPUSP).
- 31-ELKINS, B. V., WILSON, J. E., GERSBERG, R. M., **Complete reclamation of wastewater and sludge**. Journal Water Sciencie Technology., 17, 1453-1454. 1985.
- 32-ESTRELLA, Silvana. Penedo. **Diagnóstico de resíduos sólidos industriais em Santa Catarina: valorização na construção civil**. Santa Catarina: UFSC, 1996.Dissertação ( Mestre em Engenharia Civil) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal deSanta Catarina, 1996.
- 33-FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA-FIESC, **Boletim Setor Econômico-Estatístico**, Santa Catarina, 1996; pag. 07 - 20.
- 34-FREEMAN, Harry M. (ed.). **Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal**. Section 7.8 - Solidification and stabilization technology. McGraw-Hill,1989. Cap. 8 , seção 7.8 , pag 7.85 á 7.100.
- 35-HANNA, Rosângela A. **Estudo em escala de laboratório da fixação de metais pesados em matriz de cimento tendo em vista a disposição final de rejeitos industriais perigosos**. São Paulo: EPUSP, 1990. 88p. Dissertação. (Mestrado em engenharia química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990.-
- 36-JACKMAN, Alan P. & POWELL, Robert L., **Harzardous waste treatement technologies**, Park Ridge, Ed. Noyes, 1991.

- 37-KATO, H., TAKESUE, M., **Manufacture of artificial fine lightweight aggregate from sewage sludge by multistage stream kiln.** Proc. Int. Conf. of RECYCLING, Berlin, Germany, 459-464, 1984.
- 38-KORCHI, T. EL & MELCHINGER, K. & GRESS, D., **The effect of chloride, sulfate and seawater solutions on the expansion and cracking of portland cement stabilized cadmium hazardous waste.** United States of America, International Conference Cement Microscopy, 1987.
- 39-MAI, Décio T. **Caracterização físico-química de rejeitos do tratamento de efluentes líquidos de indústrias têxteis.** Relatório Final. FURB - Fundação Universidade Regional de Blumenau, Centro Tecnológico, Eng. Química; Blumenau; 1992.
- 40-MARTINS, Geruza B.H., **Práticas Limpas Aplicadas Às Indústrias Têxteis de Santa Catarina.** Florianópolis, UFSC, 1997. 126p. Dissertação. (Mestrado em engenharia de produção e sistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
- 41-MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.** Ed Pini, São Paulo, 1984, 573 p.
- 42-Negreiros, F. T.; **Fabricação de Material Cerâmico com Argila e Cinzas de Carvão Mineral.** Florianópolis: UFSC, 1993. 63p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.
- 43-OLIVEIRA, Katia D. **Disposição de rejeitos perigosos: estudo, em escala de laboratório, da solidificação/estabilização de rejeitos fenólicos em cimento portland e argilas organofílicas.** São Paulo: EPUSP, 1992. 121p. Dissertação. (Mestrado em engenharia química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1992.
- 44-POON, C.S.; CLARK, A. I. **Permeability study on the cement based solidification process for the disposal of hazardous wastes,** cement and concrete research, volume 16, nº 2, 1986.
- 45-PRIM. E.C.C. **Relatório de visita técnica à indústrias têxteis de Blumenau.** Florianópolis – UFSC, 1996. (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.
- 46-PRIM. E.C.C., CASTILHOS JR., A.B., MALIK, J.C. **Solidificação do lodo da indústria têxtil.** In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. João Pessoa – Paraíba, 1998. (no prelo).

- 47-ROCHA, J.C., MENDES, M.R., RIELLA, H.G. **Use of industrial waste in the production of lightweight aggregates for the construction industry.** IN: First International Conference on Construction Industry Development. Singapura, 1997.
- 48-SANTOS, Silvia. **Estudo da Viabilidade de Utilização de Cinza de Casca de Arroz Residual em Argamassas e Concretos.** Florianópolis – UFSC , 1997. 111P. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
- 49-SAUTEREY, R. Allocution d'ouverture. In: **Colloque international sur l'utilisation des sous-produits et déchets dans le génie civil.**, Paris: AAIEENPC, v. 3 p. 1-9, 1978.
- 50-SCHOFIELD, J.T., **Lealosafe : Toxic and Hazardous Waste Disposal,** p. 297, cap.15.
- 51-SHERIFF, T.S. et al – **The Use of Activation Charcoal and Tetra-Alkylammonium-Substituted Clays in Cement – Based Stabilization/solidification of Phenols and Chlorinated Phenols** – Imperial College – London.
- 52-SILVA, Paulo F. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana.** Ed. Pini, São Paulo, 1995.
- 53-SLOOT, H.A. van der. **Systematic Leaching Behaviour of Trace Elements from Construction Materials and Waste Materials.** Waste Materials in Construction, Elsevier Science Publishers, 1991.
- 54-ST. GEORGE, M., **Concrete aggregate from wastewater sludge.** J. Concr. Int., 8(11), 27-30, 1986.
- 55-TAY, J. H., **Sludge and incinerator residue as building and construction materials.** Proc. INTERCLEAN'84 Conf., Singapoure, 252-261, 1984.
- 56-TAY, J. H., **Bricks manufactured from sludge.** Journal of Environmental Engineering, ASCE, 113(2), 278-283, 1987a.
- 57-TAY, J. H., **Properties of pulverized sludge ash blended cement.** ACI Mater Journal, 84(5), 358-364, 1987b.
- 58-TAY, J. H., **Sludge ash as filler for portland cement concrete;** Journal of Environmental Engineering, ASCE, 113 ( 2 ), pag. 345 – 351, 1987c.
- 59-TAY, J. H. E YIP, W. K., **Sludge ash as lightweight concrete material;** Journal of Environmental Engineering, ASCE, 115 ( 1 ), pag. 56 - 64; 1989.

- 60-TAY, J. H. E SHOW, K. Y., **Properties of cement made from sludge**; Journal of Environmental Engineering, ASCE, 117 ( 2 ); pag. 236 - 246; 1991
- 61-WENG, C. H. E HUANG, C. P., **Fly ash and cement fixation**; Journal of Environmental Engineering, ASCE, 120 ( 6 ); pag. 1470 - 1487; 1994.

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1**

## PROCESSOS ESPECÍFICOS

PROCESSO	DESCRIÇÃO	TIPO DE RESÍDUOS TRATADOS	TIPO DE RESÍDUOS INCOMPATÍVEIS
Chemifix	técnica baseada na adição de cimento e silicatos solúveis.	— maioria	— alguns tipos incluindo determinados compostos orgânicos ou ânions tóxicos.
Seslosafe (Stablex)	técnica que consiste na introdução de dois tipos de aditivos baseados em silicatos.	— inorgânicos; — orgânicos passíveis de serem incorporados homogeneamente na fase aquosa — metais pesados inclusive mercúrio, arsênio e asbestos.	— oleosos, solventes e graxas.
Actor Radwaste Solidification System	técnica baseada em alvenaria (usando cimento).	— os provenientes dos reatores de água das usinas nucleares.	— lamas que não combinam com o cimento.
Calciflofix	técnica baseada na adição de pó de origem inorgânica.	— todos baseados em cálcio, provenientes de lavagem de gás $SO_2$ ; — provenientes do processamento de minerais inorgânicos com grandes quantidades de sílica e alumina; — os provenientes do preparo de carvão fino — os provenientes de fábrica de urânio.	— lodos contendo resíduos orgânicos e — lamas de esgoto.
E.T.C. Solidification System	técnica baseada na adição de cal e reagentes adequados.	— ácidos gastos de decapagem; — soluções gastos de galvanização; — lodos do sistema de tratamento de resíduos industriais — lodos provenientes do lavador de gases e lodos orgânicos.	— informações não disponíveis.
Envirotech Corporation	técnica baseada na adição de cimento e silicato de sódio.	— informações não disponíveis.	— informações não disponíveis.
Poz-O-Tec	técnica baseada na adição de cinzas finas e outros aditivos.	— lodos provenientes do lavador de gás $SO_2$ — os provenientes de processos químicos, de galvanoplastia e de fabricação de aço.	— orgânicos (alguns).
Enviroclean	técnica baseada na adição de cimento Portland ou cal e pozolânico, ou cimento e cal, e pozolânicos.	— industriais — municipais (alguns).	— orgânicos (maioria) e resíduos com menos de 15% de sólidos.
Canadion Waste Technology Inc.	técnica baseada na produção de compostos de silicatos estáveis análogos aos materiais geológicos naturais.	— Industriais inorgânicos — lodos de esgotos das instalações de tratamento primário.	— orgânicos (alguns).

PROCESSO	DESCRIÇÃO	TIPO DE RESÍDUOS TRATADOS	TIPO DE RESÍDUOS INCOMPATÍVEIS
Polymeric Materials Section-Washington State University	técnica baseada em polímero orgânico (resina poliéster).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- radioativos;</li> <li>- inorgânicos com íons metálicos, cianatos ou arsênio;</li> <li>- orgânicos (alguns) e os provenientes da indústria farmacêutica (alguns).</li> </ul>	- lamas altamente ácidas (especialmente com pH 1,0).
Protective Packaging Inc.	técnica baseada em polímeros orgânicos.	- nucleares.	- informações não disponíveis.
Terra Crete	técnica baseada em processo de auto-cimentação.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lodos baseados em sulfito/sulfeto</li> <li>- lodos de sulfito de cálcio/sulfato.</li> </ul>	- nenhuma especificação.
Terra Tite	técnica baseada em adição de materiais cimentosos.	- industriais (maioria).	- nenhuma especificação.
TST-Takenaka Sludge Treatment System	técnica baseada em adição de cimento ou materiais baseados em cimento e aditivos especiais.	- lamas com teores de água relativamente elevados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- com teores de gorduras e óleos superiores a 20%</li> <li>- lodo contendo grandes quantidades de resíduos de pintura.</li> </ul>
Safe-T-Set	técnica baseada em polímeros orgânicos.	- lodos radioativos.	- não testado em outros resíduos industriais.
TRW Systems Group	<p>técnicas baseadas na adição de:</p> <p>a) cimentos inorgânicos: cimento Portland tipo 2, gesso e cal</p> <p>b) resinas polibutadieno de configurações estereo específicas (1,2 polibutadieno atático).</p>	- sólidos e lodos (maioria), particularmente aqueles contendo arsênio, mercúrio, selênio, cromo, cádmio e chumbo.	- não estipulado.
Werner and Pfleiderer Corp.	técnica baseada em betume.	- lodos ou sólidos contendo arsênio.	- lodos contendo oxidantes fortes tais como nitratos, cloratos, percloratos e persulfatos.

**ANEXO 1a**

#### 4.1. Ensaio de resistência mecânica

TABELA 4.1.

Ensaio de resistência mecânica - Traço 4:1

C.P. n.o	DATAS		IDADE (dias)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	
	MOLDAGEM	RUPTURA		PONTUAL	MÉDIA
1	01/09/92	08/09/92	7	2,60	2,57
2	01/09/92	08/09/92	7	2,50	
3	01/09/92	08/09/92	7	1,90	
4	01/09/92	08/09/92	7	1,60	
5	01/09/92	08/09/92	7	2,60	
6	01/09/92	08/09/92	7	4,10	
7	01/09/92	29/09/92	28	4,20	3,67
8	01/09/92	29/09/92	28	3,50	
9	01/09/92	29/09/92	28	3,30	
10	01/09/92	29/09/92	28	3,80	
11	01/09/92	29/09/92	28	3,70	
12	01/09/92	29/09/92	28	2,50	
13	01/09/92	30/11/92	90	3,00	2,90
14	01/09/92	30/11/92	90	3,40	
15	01/09/92	30/11/92	90	3,80	
16	01/09/92	30/11/92	90	6,00	
17	01/09/92	30/11/92	90	4,20	
18	01/09/92	30/11/92	90	2,80	

O ajuste linear das médias acima permitiu a seguinte extrapolação:

IDADE (dias)	TENSÃO DE RUPTURA ESTIMADA (MPa)
120	3,07
150	3,07
180	3,08
210	3,09
240	3,10
270	3,10
300	3,11
330	3,12
360	3,13
390	3,13
420	3,14
450	3,15
480	3,15
510	3,16
540	3,17
570	3,18
600	3,18
630	3,19

TABELA 4.2.

Ensaio de resistência mecânica - Traço 5:1

C.P. n.o	DATAS		IDADE (dias)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	
	MOLDAGEM	RUPTURA		PONTUAL	MÉDIA
1	03/09/92	10/09/92	7	9,20	9,20
2	03/09/92	10/09/92	7	9,60	
3	03/09/92	10/09/92	7	10,90	
4	03/09/92	10/09/92	7	9,10	
5	03/09/92	10/09/92	7	12,20	
6	03/09/92	10/09/92	7	8,90	
7	03/09/92	01/10/93	28	6,60	21,10
8	03/09/92	01/10/93	28	14,10	
9	03/09/92	01/10/93	28	20,60	
10	03/09/92	01/10/93	28	21,60	
11	03/09/92	01/10/93	28	19,20	
12	03/09/92	01/10/93	28	17,30	
13	03/09/92	02/12/92	90	17,40	17,07
14	03/09/92	02/12/92	90	17,20	
15	03/09/92	02/12/92	90	12,60	
16	03/09/92	02/12/92	90	16,60	
17	03/09/92	02/12/92	90	12,10	
18	03/09/92	02/12/92	90	13,70	

O ajuste linear das médias acima permitiu a seguinte extrapolação:

IDADE (dias)	TENSÃO DE RUPTURA ESTIMADA (MPa)
120	20,37
150	22,12
180	23,88
210	25,63
240	27,38
270	29,14
300	30,89
330	32,65
360	34,40
390	36,15
420	37,91
450	39,66
480	41,42
510	43,17
540	44,92
570	46,68
600	48,43
630	50,18

OBSERVAÇÕES : 1. O corpo de prova no. 7 apresentava-se fissurado antes de submetido ao ensaio.

TABELA 4.3.

Ensaio de resistência mecânica - Traço 6:1

C.P. n.o	DATAS		IDADE (dias)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	
	MOLDAGEM	RUPTURA		PONTUAL	MÉDIA
1	14/09/92	21/09/92	7	7,00	6,80
2	14/09/92	21/09/92	7	3,90	
3	14/09/92	21/09/92	7	5,40	
4	14/09/92	21/09/92	7	11,20	
5	14/09/92	21/09/92	7	6,60	
6	14/09/92	21/09/92	7	5,00	
7	14/09/92	12/10/92	28	4,60	4,60
8	14/09/92	12/10/92	28	4,70	
9	14/09/92	12/10/92	28	4,60	
10	14/09/92	12/10/92	28	4,80	
11	14/09/92	12/10/92	28	4,30	
12	14/09/92	12/10/92	28	4,50	
13	14/09/92	13/12/92	90	2,40	2,50
14	14/09/92	13/12/92	90	4,40	
15	14/09/92	13/12/92	90	2,60	
16	14/09/92	13/12/92	90	8,90	
17	14/09/92	13/12/92	90	2,20	
18	14/09/92	13/12/92	90	3,90	

Ajustando-se as médias dos dados acima expostos a uma curva exponencial, obtivemos a seguinte extrapolação:

IDADE (dias)	TENSÃO DE RUPTURA ESTIMADA (MPa)
120	1,73
150	1,22
180	0,87
210	0,61
240	0,43
270	0,31
300	0,22
330	0,15
360	0,11
390	0,08
420	0,05
450	0,04
480	0,03
510	0,02
540	0,01
570	0,01
600	0,01
630	0,00

TABELA 4.4.

Ensaio de resistência mecânica - Traço 7:1

C.P. n.o	DATAS		IDADE (dias)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	
	MOLDAGEM	RUPTURA		PONTUAL	MÉDIA
1	17/09/92	24/09/92	7	8,70	5,55
2	17/09/92	24/09/92	7	7,50	
3	17/09/92	24/09/92	7	5,60	
4	17/09/92	24/09/92	7	5,50	
5	17/09/92	24/09/92	7	5,00	
6	17/09/92	24/09/92	7	3,90	
7	17/09/92	15/10/92	28	3,70	
8	17/09/92	15/10/92	28	7,40	8,65
9	17/09/92	15/10/92	28	5,30	
10	17/09/92	15/10/92	28	14,30	
11	17/09/92	15/10/92	28	8,90	
12	17/09/92	15/10/92	28	8,40	
13	17/09/92	16/12/92	90	8,70	7,25
14	17/09/92	16/12/92	90	8,50	
15	17/09/92	16/12/92	90	7,10	
16	17/09/92	16/12/92	90	5,00	
17	17/09/92	16/12/92	90	7,40	
18	17/09/92	16/12/92	90	6,60	

O ajuste linear das médias acima permitiu a seguinte extrapolação:

IDADE (dias)	TENSÃO DE RUPTURA ESTIMADA (MPa)
120	7,99
150	8,31
180	8,63
210	8,95
240	9,27
270	9,59
300	9,91
330	10,23
360	10,55
390	10,87
420	11,19
450	11,51
480	11,83
510	12,15
540	12,47
570	12,80
600	13,12
630	13,44

TABELA 4.5.

Ensaio de resistência mecânica - Traço 8:1

C.P. n.o	DATAS		IDADE (dias)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	
	MOLDAGEM	RUPTURA		PONTUAL	MÉDIA
1	21/09/92	28/09/92	7	16,30	9,40
2	21/09/92	28/09/92	7	9,10	
3	21/09/92	28/09/92	7	15,50	
4	21/09/92	28/09/92	7	9,70	
5	21/09/92	28/09/92	7	8,60	
6	21/09/92	28/09/92	7	13,70	
7	21/09/92	19/10/92	28	18,20	19,17
8	21/09/92	19/10/92	28	19,40	
9	21/09/92	19/10/92	28	19,90	
10	21/09/92	19/10/92	28	14,40	
11	21/09/92	19/10/92	28	11,20	
12	21/09/92	19/10/92	28	11,40	
13	21/09/92	20/12/92	90	13,90	16,25
14	21/09/92	20/12/92	90	14,50	
15	21/09/92	20/12/92	90	16,40	
16	21/09/92	20/12/92	90	16,10	
17	21/09/92	20/12/92	90	23,00	
18	21/09/92	20/12/92	90	11,50	

O ajuste linear das médias acima permitiu a seguinte extrapolação:

IDADE (dias)	TENSÃO DE RUPTURA ESTIMADA (MPa)
120	19,09
150	20,69
180	22,28
210	23,87
240	25,46
270	27,05
300	28,64
330	30,23
360	31,82
390	33,42
420	35,01
450	36,60
480	38,19
510	39,78
540	41,37
570	42,96
600	44,55
630	46,15

TABELA 4.6.

Ensaio de resistência mecânica - Traço 6:1 (A)

C.P. n.o	DATAS		IDADE (dias)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	
	MOLDAGEM	RUPTURA		PONTUAL	MÉDIA
1	25/09/92	02/10/92	7	31,80	31,03
2	25/09/92	02/10/92	7	42,00	
3	25/09/92	02/10/92	7	29,50	
4	25/09/92	02/10/92	7	36,20	
5	25/09/92	02/10/92	7	31,80	
6	25/09/92	02/10/92	7	46,10	
7	25/09/92	23/10/92	28	58,60	66,20
8	25/09/92	23/10/92	28	66,70	
9	25/09/92	23/10/92	28	38,70	
10	25/09/92	23/10/92	28	50,90	
11	25/09/92	23/10/92	28	64,20	
12	25/09/92	23/10/92	28	67,70	
13	25/09/92	24/12/92	90	29,00	36,35
14	25/09/92	24/12/92	90	22,40	
15	25/09/92	24/12/92	90	34,00	
16	25/09/92	24/12/92	90	44,80	
17	25/09/92	24/12/92	90	38,70	
18	25/09/92	24/12/92	90	15,80	

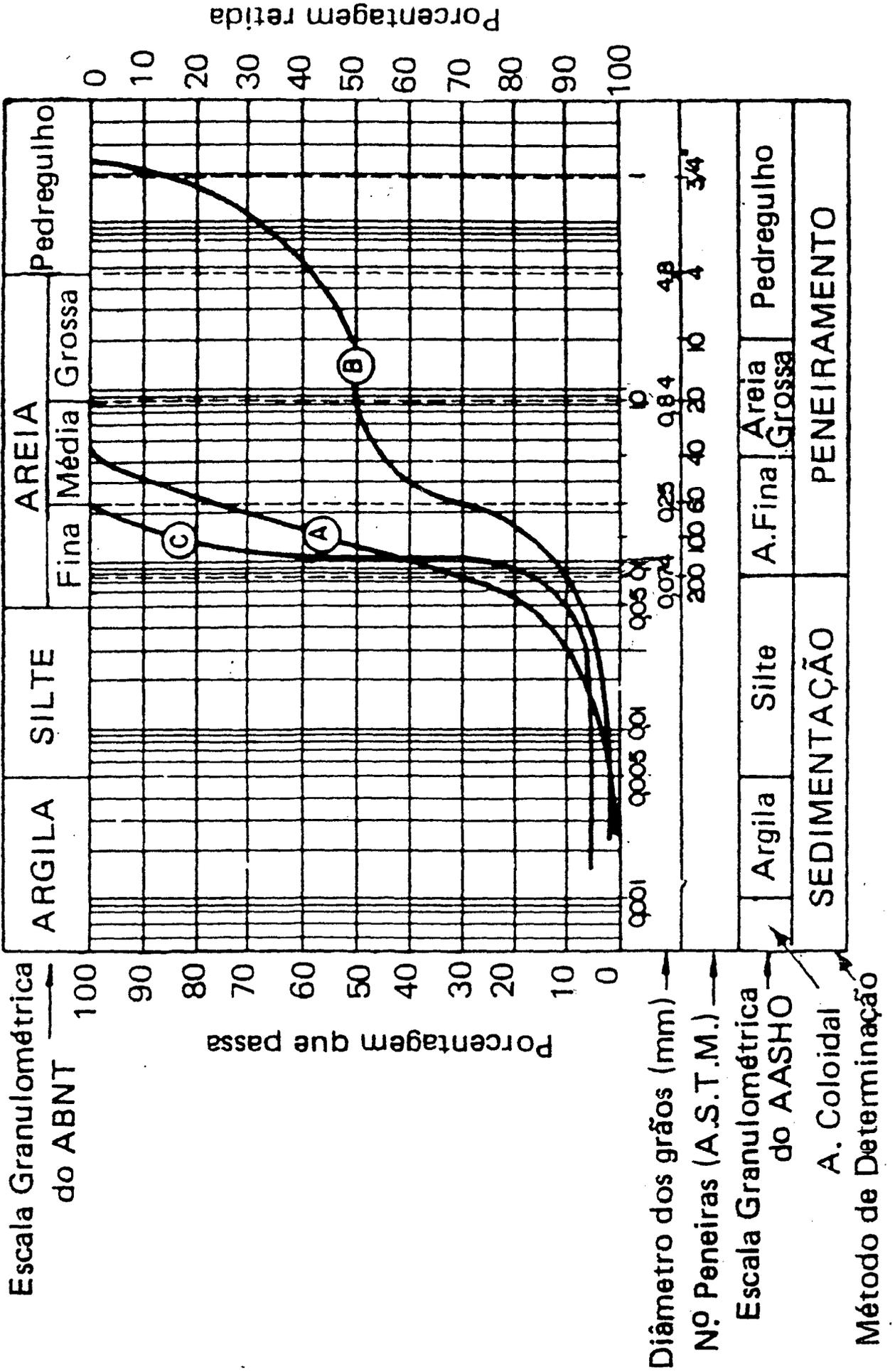
Ajustando-se as médias dos dados acima expostos a uma curva exponencial, obtivemos a seguinte extrapolação:

IDADE (dias)	TENSÃO DE RUPTURA ESTIMADA (MPa)
120	39,78
150	38,92
180	38,08
210	37,26
240	36,46
270	35,67
300	34,90
330	34,15
360	33,41
390	32,69
420	31,99
450	31,30
480	30,62
510	29,96
540	29,31
570	28,68
600	28,06
630	27,46

OBSERVAÇÕES:

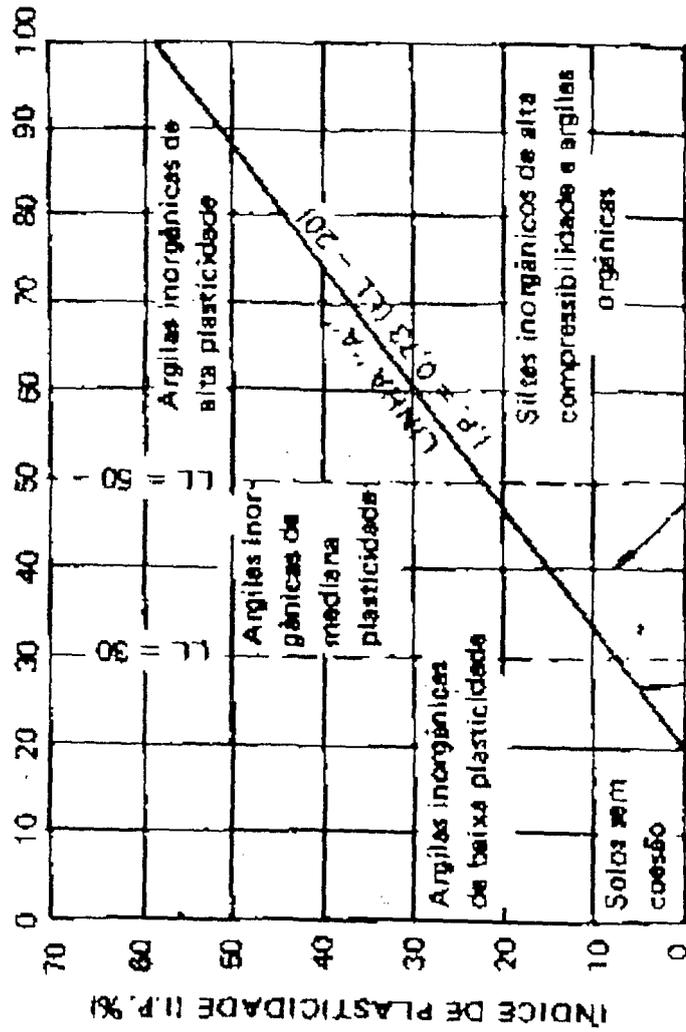
1. A média referente ao lote 3 admitiu dados com desvio relativo de 6,46%.

**ANEXO 2**



**ANEXO 3**

LIMITE DE LIQUIDEZ (LL %)



Siltes inorgânicos de baixa compressibilidade

Siltes inorgânicos de mediana compressibilidade e siltes orgânicos

**ANEXO 4**

# Cimento Portland

