

APROVEITAMENTO DO RESÍDUO  
DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CUBATÃO  
PARA FABRICAÇÃO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS ESTRUTURAIS

Eliane Gomes Pereira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof. Francisco José Casanova de Oliveira e Castro D.Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Maria Cláudia Barbosa, D.Sc.

---

Prof. Jacques de Medina, L.D.

---

Prof. Hélio Fernandes Machado Jr., Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2008

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

PEREIRA, ELIANE GOMES

Aproveitamento do Resíduo da Estação de Tratamento de água de Cubatão para fabricação de elementos construtivos estruturais [Rio de Janeiro] 2008

XI, 100p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2008)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Aproveitamento de Resíduos, Alvenaria, Lodo de Estação de Tratamento de Água

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*“ SER FELIZ NÃO É UM ESTADO GRANDIOSO E ETERNO.  
AO CONTRÁRIO, É UMA SOMA DE PEQUENOS MOMENTOS LUMINOSOS  
QUE A PESSOA VAI COLECIONANDO AO LONGO DA VIDA”.*

*( DALAI LAMA )*

***Dedico esta dissertação aos meus  
pais: Milton Pereira (em memória)  
e Vanice da Silva Pereira pelo  
exemplo de fé e esperança.***

***Às minhas queridas filhas: Camilla  
e Caroline pela compreensão e  
carinho.***

***Aos meus irmãos que tanto amo.***

## **AGRADECIMENTOS**

*Primeiramente a Deus por me fazer seguir sempre em frente.*

*Ao professor Francisco José Casanova que acompanhou e norteou todos os passos deste trabalho. Agradeço por sua atenção, paciência, dedicação e disponibilidade em todos momentos que precisei.*

*As técnicas Glória e Maiara pelo apoio constante ao longo deste trabalho.*

*A amiga Ana Maria pelas palavras de incentivo nos momentos difíceis.*

*Aos amigos Jefferson e Renata pelo carinho e colaboração durante a realização dos ensaios.*

*A todos os amigos e colegas de turma que participaram desta jornada.*

*A Diretora do Escritório Técnico da UFRJ, Professora Maria Ângela e ao Prefeito da UFRJ, Professor Hélio por terem me liberado para estudar.*

*A todos os Professores e Técnicos do Laboratório de Geotecnia pela forma que se dedicam a formação profissional, científica e pessoal dos alunos.*

*A CETESB pelo fornecimento do resíduo que foi a matéria prima para este trabalho.*

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

APROVEITAMENTO DO RESÍDUO  
DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CUBATÃO  
PARA FABRICAÇÃO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS ESTRUTURAIS

Eliane Gomes Pereira

Julho/2008

Orientador: Francisco José Casanova de Oliveira e Castro

Programa: Engenharia Civil

Neste trabalho analisou-se a possibilidade do aproveitamento do Lodo gerado na Estação de Tratamento de Água de Cubatão para a fabricação de elementos construtivos estruturais estabilizados, conformados a frio por prensagem estática. Para tal obteve-se em laboratório um aglomerante, aplicando-se os princípios diagenéticos, através da utilização de um aldeído como agente polimerizante do silicato. Os resultados dos ensaios de Resistência à Compressão Simples, até 9,2MPa, permitiram concluir a viabilidade do aproveitamento do referido resíduo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THE USE OF THE WASTE FROM THE WATER TREATMENT PLANT OF CUBATÃO  
TO MANUFACTURE STRUCTURAL ELEMENTS

Eliane Gomes Pereira

July / 2008

Advisor: Francisco Jose Casanova de Oliveira e Castro

Department: Civil Engineering

This study examined the possibility of the use of waste from the water treatment plant of Cubatão the manufacture of structural elements constructive stabilized, conformed by pressing the cold static. To that end up in the laboratory obtained a binding agent, according to the principles diagenetic, through the use of an agent as aldehyde polimerizante of silicate. The results of tests of simple resistance to compression, to 9.2 MPa, have concluded the feasibility of the use of that waste.

## **SUMÁRIO**

### **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

1.1. Importância do estudo no contexto atual	1
1.2. Objetivos do estudo	2
1.2.1. Objetivos gerais	2
1.2.2. Objetivo específico	5
1.3. Estrutura da dissertação.	6

### **CAPÍTULO 2 – RECICLAGEM E SEUS BENEFÍCIOS**

2.1. Reciclagem na atualidade	7
2.2. Resíduos sólidos no Brasil	8
2.3. Construção Civil	10
2.3.1. Tijolo Solo-Cimento	11
2.4. Recursos Naturais	12
2.4.1. Cimento	12
2.4.2. Argila	14
2.4.3. Cal Hidratada	15
2.4.4. Areia	16
2.5. Consumo de energia	16
2.6. Déficit Habitacional	17

### **CAPÍTULO 3 – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

3.1. Panorama Atual	19
3.2. Estação de Tratamento de Água de Cubatão	19
3.2.1. Processo de Tratamento de Água	21
3.3. Métodos de Disposição Final do LETA	25
3.3.1. Métodos de disposição do LETA em outros países	29
3.3.2. Proposta para disposição do LETA de Cubatão	31
3.4. Impactos Ambientais	32
3.5. Aspectos Legais	33
3.6. Alternativas para Tratamento e reciclagem do LETA	34
3.6.1. Incorporação em Blocos Cerâmicos	34

3.6.1.1. ETA de Campos dos Goitacazes/RJ	34
3.6.1.2. ETA de São Leopoldo/RS	35
3.6.1.3. ETA de Cubatão/SP	35
3.6.2. Considerações sobre o LETA	36
3.6.3. Incorporação do LETA em Argamassa e Concretos	36

## **CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS**

4.1. Materiais Utilizados	38
4.1.1. Resíduo de Estação de Tratamento de Água	38
4.1.1.1. Processo de geração do LETA de Cubatão	39
4.1.1.2. Características do resíduo	40
4.1.1.3. Características Físicas	45
4.1.1.4. Características químicas	48
4.1.1.5. Características mineralógicas	50
4.1.1.6. Periculosidade ambiental	50
4.1.2. Cimento	54
4.1.3. Silicato de Sódio Alcalino	54
4.1.4. Glutaraldeído	56
4.1.5. Areia	56
4.1.6. Cal Hidratada	57
4.1.7. Pó de Pedra	57
4.2. Programa Experimental	59
4.2.1. Ensaio Retração Linear	59
4.2.2. Ensaio Físico-Químico-Procedimento Experimental	59
4.2.2.1. Etapas do Método Físico-Químico	60
4.2.2.2. Ensaios Físico-Químicos realizados	61
4.2.3. Ensaio de RCS – Procedimento Experimental	62

## **CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

5.1. Resultados dos Ensaios de Retração Linear	68
5.2. Resultados dos Ensaios Físico-Químicos	73
5.2.1. Sistema [LETA+Cal+Cimento]	73

5.3. Resultados dos Ensaio Mecânicos	76
5.3.1. Sistema I [Areia/Silicato/Glutaraldeído/Cimento]	76
5.3.2 Sistema II [LETA (199%) /Areia/Silicato/Glutaraldeído/Cimento]	78
5.3.3 Sistema III [Areia/Silicato/Glutaraldeído/Cimento]	79
5.3.4 Sistema IV [LETA (100%) /Areia/Silicato/Glutaraldeído/Cimento]	81
5.3.5 Sistema V [LETA (70%) /Areia/Silicato/Glutaraldeído/Cimento]	82
5.3.6 Sistema VI [LETA (40%) /Areia/Silicato/Glutaraldeído/Cimento]	83
5.3.7 Sistema VII [LETA (30%) /Areia/Silicato/Glutaraldeído/Cimento]	85
5.3.8 Sistema VIII [LETA/Silicato/Glutaraldeído/Cimento]	86
5.3.9 Sistema IX [LETA/Areia/Silicato/Glutaraldeído/Cimento]	87
5.3.10 Sistema X [LETA/Cimento]	89

## **CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

6.1. Conclusões	94
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	95

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>96</b>
-----------------------------------	-----------

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

Ci – Cimento Portland

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CP – Corpo de Prova

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Água

F (a/s) – Fator água / sólidos

FGV – Fundação Getúlio Vargas

f i - valor individual

f m - valor médio da amostra

Glut – Glutaraldeído

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDS – Indicadores de Desenvolvimento Sustentável

IP – Índice de Plasticidade

IQA – Índice de Qualidade da Água

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

LETA – Lodo de Estação de Tratamento de Água

MFQ – Método Físico Químico

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

Pnad – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

RCS – Resistência à Compressão Simples

Sabesp – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SEMAE – Serviço Municipal de Água e Esgoto de São Leopoldo

Sil – Silicato de Sódio Alcalino

Sinic – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

Sinduscon – Sindicato da Indústria da Construção

UNISINOS – Universidade do Vale do Rio Sinos

W - Umidade

$\rho_d$  – Massa Específica Aparente Seca

$\Delta V$  – Variação Volumétrica

# ***CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO***

## **1.1.IMPORTÂNCIA DO ESTUDO NO CONTEXTO ATUAL**

O tema aproveitamento de resíduos revela um nível de prioridade em relação ao assunto que até então não existia. Tal fato se deve à pressão dos órgãos ambientais e à legislação que responsabiliza os geradores pelo manuseio e destinação dos próprios resíduos. Porém, o desconhecimento de técnicas adequadas para o aproveitamento de resíduos na produção de materiais secundários e elementos construtivos constitui um grave problema para a população e o meio ambiente (ROCHA e CHERIAF, 2002).

Por outro lado, a produção e utilização de recursos naturais não renováveis para abastecer a industrialização não são mais suportáveis. As tendências tecnológicas sinalizam novos rumos para exploração desses recursos e conseqüentemente para a preservação do meio ambiente.

Segundo MEDINA (2006) pode-se dizer que a reciclagem é uma atividade tão antiga quanto a própria metalurgia. Na idade média, por exemplo, as armaduras e armas dos vencidos eram recicladas pelos vencedores por razões econômicas. Porém no final do século XX iniciou-se um movimento de conscientização em relação ao meio ambiente, com uma nova concepção para produção e consumo sustentáveis de recursos naturais quando a reciclagem passa a fazer parte da gestão ambiental da produção, com a preocupação sobre a destinação final dos resíduos provenientes da industrialização e dos materiais em final de vida útil.

Essa conscientização em relação ao meio ambiente requer não somente transformação tecnológica mas também mudanças políticas e culturais que tendem a substituir o mercado atual de consumo de produtos descartáveis pelo mercado de produtos duráveis e recicláveis. Hoje existe uma conscientização mundial, onde muitas

peças já se interessam em conhecer os produtos que estão consumindo para se assegurarem de que eles não fazem mal à sua saúde e ao meio ambiente.

Embora não exista solução única para todos os problemas ambientais, a reciclagem é uma alternativa viável a curto e médio prazo e surge como atividade econômica, com esperança de se ter um modelo de desenvolvimento competitivo e ao mesmo tempo sustentável no mundo.

Com a tomada de consciência inaugura-se a era da produção limpa, na qual a gestão ambiental está ligada à gestão de qualidade. Assim a produção industrial começa a ser administrada não só em termos técnicos e econômicos como também ambientais. A reciclagem permite o fechamento do ciclo de vida dos materiais, fazendo com que eles retornem como matéria-prima secundária, diminuindo assim a exploração dos recursos naturais.

## **1.2. OBJETIVOS DO ESTUDO**

### **1.2.1. Objetivos gerais**

A presente dissertação de mestrado objetiva verificar a viabilidade de utilização de resíduos industriais como matéria-prima na produção de componentes cerâmicos para construção civil. O objetivo é trabalhar os materiais atendendo a necessidade de soluções tecnológicas simplificadas, adequadas a uma nova realidade que busca preservar o meio ambiente, reduzir custos e não desperdiçar tempo na hora da construção.

A proposta de aproveitamento dos resíduos vem de encontro às normas dos órgãos ambientais que exigem seu aproveitamento, evitando a disposição, mesmo que em aterros sanitários.

O trabalho foi realizado visando a utilização prática de um material residuário, descartado em aterros, que contribua para diminuir o teor de cimento na confecção de elementos construtivos, mantendo e/ou melhorando seu desempenho mecânico.

Observando-se a natureza, vemos que cotidianamente ela produz materiais cimentados que encontram diversas aplicações na construção civil, pois apresentam níveis de resistência elevados, análogos aos do concreto. Tais materiais são formados pela diagênese, um dos processos que compõem a litificação. A diagênese pode ser definida num sentido mais restrito como o conjunto de fatores naturais que originam uma série de mudanças na composição e nas características dos sedimentos, desde o momento da deposição do material até sua transformação em rocha.

Ela abrange primariamente as reações químicas que ocorrem no interior do sedimento entre seus constituintes mineralógicos bem como as interações com o fluido intersticial. Os fenômenos que ocorrem normalmente são: reorganização microestrutural, metassomatismo (\*), dissolução (intra-estratal), compactação e cimentação. Dentre estes fenômenos o que interessa diretamente para este trabalho é a cimentação que ocorre a partir da formação de espécies químicas em solução com a subsequente precipitação química e/ou polimerização de compostos que preenchem os poros do sedimento, conferindo-lhe resistência mecânica, estabilidade dimensional/estrutural e química, além da impermeabilidade.

A tabela 2.1 lista materiais naturais cimentados que exemplificam o resultado da diagênese de diversas formações geológicas brasileiras. Vê-se que os arenitos com cimentação silicosa apresentam os melhores desempenhos em termos de resistência.

(\*) Mudanças na mineralogia do sedimento que ocorrem como resultado das interações químicas induzidas pela migração de fluidos procedentes de fontes externas.

**Tabela 2.1 – Propriedades físico-mecânicas de arenitos**

(SBRIGHI NETO e HELENE, 1993)

Formação	Descrição	Resist. à Comp. Axial (MPa)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Observações
Grupo Bauru:				
Arenito Marília	Arenito grosso	10,0 a 31,0	1,8 a 1,9	Cimento calcítico
Arenito Adamantina	Arenito fino	7,0 a 23,0	1,6 a 1,8	Cimento calcítico
Arenito Santo Anastácio	Arenito fino e médio	0,8 a 5,5	1,7 a 1,9	Cimento argiloso e ferruginoso
Arenito Caiuá	Arenito fino e médio	0,6 a 14,0	1,8 a 2,1	Cimento ferrug./carbonático
Arenito Botucatu	Arenito fino e médio	80,0 a 83,0(seco) 64,0 (úmido)	2,3 a 2,4	Cimento silicoso
Piramboia	Arenito	5,0 a 29,0	1,8 a 2,4	Cimento argiloso/calcítico
Manaus	Arenito	29,0 a 100,0	2,4 a 2,5	Cimento silicoso
Trombetas	Arenito	40,0 a 80,0	2,2 a 2,5	Cimento silicoso
Aquidauana	Arenito Conglomerático	27,4 (seco) 14,0 (úmido)	2,2 a 2,4	Cimento ferruginoso
Aquidauana	Arenito fino e médio	1,8 (seco) 0,58 (úmido)	2,0 a 2,3	Cimento argiloso
Rosário do Sul	Arenito fino e médio	5,0 a 29,0	2,0 a 2,1	Cimento silicoso
São Luiz	Arenito médio	15,0	2,3 a 2,5	Cimento ferruginoso
São Luiz	Arenito fino	16,0	2,5 a 2,6	Cimento ferruginoso

Assim, este trabalho visou reproduzir em laboratório o resultado da diagênese fazendo uso de seus princípios e envolvendo a sílica como espécie química precursora do

cimento, utilizando o silicato de sódio combinado a um agente polimerizante à temperatura ambiente.

SBRIGHI NETO e HELENE (1993) abordaram experimentalmente tal enfoque, porém, fazendo uso da areia, da sílica gel coloidal e do ácido cítrico, obtendo resultados para a Resistência à Compressão Axial de (22 e 34)MPa para 7 e 28 dias, respectivamente. Não obstante, a obtenção desses resultados requereu o tratamento do sistema à temperatura de 110°C ou maior, pelo menos durante 48h.

### **1.2.2. Objetivo específico**

O presente estudo tem como finalidade determinar a possibilidade de uso do LETA (Lodo de Estação de Tratamento de Água) de Cubatão para a fabricação de elementos construtivos estabilizados.

Para tal foi escolhido o cimento Portland adicionado ao sistema químico que faz reagir silicato de sódio alcalino ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) com um aldeído à temperatura ambiente. O glutaraldeído reage com os íons do silicato dando origem a uma rede tridimensional, que de acordo com a composição do sistema e a temperatura, ganha resistência com maior ou menor rapidez.

Através da confecção de corpos de prova em laboratório determinou-se a Resistência à Compressão Simples (RCS) e a viabilidade do aproveitamento do resíduo para fabricação de elementos construtivos estruturais conformados a frio por prensagem estática.

### **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação é composta por seis capítulos e está organizada de seguinte maneira:

No capítulo 1 é apresentada a importância do aproveitamento de resíduos na atualidade, visando a possibilidade da utilização de materiais alternativos para fabricar elementos construtivos estruturais. São também apresentados os objetivos gerais e específico e a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 aborda sobre a reciclagem e seus benefícios. Apresenta aspectos relevantes sobre resíduos sólidos, construção civil, recursos naturais, consumo de energia e déficit habitacional que podem ser beneficiados pelo aproveitamento de resíduos.

No capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica sobre o resíduo gerado nas estações de tratamento de água e especificamente sobre o resíduo utilizado no presente estudo, Lodo da Estação de Tratamento de Água - LETA - Cubatão.

No capítulo 4 são apresentados os materiais utilizados, o programa experimental da pesquisa e os ensaios realizados.

O capítulo 5 é dedicado aos resultados encontrados bem como às análises e discussão.

O capítulo 6 é dedicado às conclusões desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## ***CAPÍTULO 2 - RECICLAGEM E SEUS BENEFÍCIOS***

### **2.1. RECICLAGEM NA ATUALIDADE**

Reduzir, reutilizar e reciclar é uma forma de promover a melhoria da qualidade do meio ambiente e da sociedade, através da geração de emprego e de renda.

Dentre os inúmeros problemas ambientais promovidos pelo crescimento das cidades, da industrialização e do consumo, a destinação do grande volume de resíduos sólidos produzidos pelas atividades humanas vem preocupando constantemente empresários, gestores públicos e, principalmente, a população que é atingida diretamente pelos impactos ambientais ligados à disposição (adequada ou não) dos resíduos. Afora a questão da destinação, há também problemas vinculados à população que vive dos resíduos: os catadores. E nesse contexto a reciclagem é uma alternativa para conjugar qualidade ambiental e geração de renda.

Até 35% do lixo coletado nos aterros pode ser reciclado (papel, vidro, plástico, metais), ou seja, 35% menos materiais deixariam de ser absorvidos pelo ambiente (plásticos demoram 450 anos para serem decompostos e vidros, cerca de 1 milhão de anos). 74% da poluição do ar e 35% da poluição da água poderiam ser reduzidos através da reciclagem e reutilização de materiais.

A relevância da reutilização e da reciclagem é muito ampla, passa pela conscientização da sociedade quanto à questão ambiental como sendo vital à sobrevivência do homem; pela diminuição da exploração dos recursos naturais (desmatamento, mineração, etc.); pelo equacionamento do consumo de energia; pela redução da poluição e da quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários, aumentando assim sua vida útil.

A reciclagem gera benefícios ambientais, econômicos e sociais. As experiências indicam que além dos benefícios ambientais, por diminuir a disposição em locais inadequados e minimizar a necessidade de extração de matéria-prima em jazidas, a reciclagem também é economicamente viável. Esta vantagem econômica dos custos do processo de reciclagem em relação aos custos dos materiais convencionais pode variar de acordo com a tecnologia empregada. De qualquer forma, na grande maioria dos casos, a reciclagem possibilita a utilização de resíduos em atividades de construção, trazendo benefícios sociais como a diminuição do déficit habitacional e a criação de novos empregos.

A reciclagem, assim como qualquer atividade humana, também pode causar impactos ao meio ambiente. Variáveis como o tipo de resíduo, a tecnologia empregada e a utilização proposta para o material reciclado podem tornar o processo ainda mais impactante do que o próprio resíduo o era antes de ser reciclado. Desta forma o processo de reciclagem acarreta riscos ambientais que precisam ser adequadamente gerenciados (ÂNGULO e ZORDAN, 2001)

A seguir são apresentados alguns aspectos relevantes que justificam a necessidade de se aproveitar cada vez mais os resíduos gerados na cadeia produtiva.

## **2.2. RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL**

O aumento do número de habitantes no planeta, associado à concentração das populações nas cidades, vem agravando a capacidade natural da terra para absorver os resíduos.

Atualmente, uma das questões mais problemáticas enfrentadas pela sociedade é a destinação dos resíduos gerados pelo consumo, o que comumente é chamado de lixo. Estatísticas indicam que uma pessoa gera diariamente cerca de 800g de resíduo, o

que não é difícil de percebermos no nosso dia-dia através do consumo de papéis, alimentos, embalagens, pilhas, pneus, etc.

No setor de limpeza urbana, a destinação final apresenta um paradoxo: Aterros com alta sofisticação técnica de engenharia coexistem com uma grande maioria de lixões sem controle algum (JARDIM, 2006). Mais de 85% dos municípios brasileiros destinam os resíduos de forma indevida, sem o menor controle e sem preocupação com o meio ambiente, provocando o surgimento dos lixões, responsáveis por uma infinidade de problemas sociais e ambientais. Além disso a falta de conhecimento, por parte da sociedade, sobre a diferença entre lixão e aterro sanitário, faz com que se tenha sempre a imagem do lixão e dos males que o acompanham.

Um aterro sanitário é bem mais que um simples local para depósito. É o local para disposição ordenada dos resíduos sólidos. O processo envolve serviço de terraplenagem, impermeabilização, sistema de drenagem do chorume e gases e cobertura. A área para instalação é selecionada através de critérios de engenharia ambiental, envolvendo estudos geológicos, geotécnicos, análise da fauna e da flora, visando evitar ou minimizar os impactos ao meio ambiente e a sociedade.

Uma pesquisa realizada em 2008 pela ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) mostra o panorama atual sobre resíduos sólidos no Brasil. Segundo a pesquisa a quantidade total de resíduos sólidos urbanos coletados, distribuído por regiões, equivalem a 7% no Centro-Oeste, 22% no Nordeste, 6% no Norte, 10% no Sul e 55% no Sudeste. Quanto às modalidades de destinação do resíduo sólido urbano coletado, 38,6% é disposto em aterro sanitário, 31,8% em aterros controlados e 29,6% em lixões. Sendo que 7,1% dos aterros sanitários possui adicionalmente um aterro de inertes.

Quanto ao Resíduo de Construção e Demolição (RCD), segundo o Sinduscon-SP, (2005) a disposição do resíduo nos aterros sanitários não é o ideal, já que existem muitas formas para o seu aproveitamento em pavimentações, contenções de encostas, canalizações de córregos, argamassas, concretos e também na confecção de elementos construtivos. Outro problema que precisa ser pensado é o desperdício de materiais de construção, causado pela má qualidade dos mesmos, pela utilização de mão de obra não qualificada e pela má gestão dos canteiros de obra. Segundo a pesquisa da ABRELPE (2008) atualmente são coletados no Brasil 72.597 toneladas por dia de RCD.

Embora as informações disponíveis pela ABRELPE (2008) não possibilitem uma totalização completa dos resíduos sólidos industriais gerados no país, uma visão parcial é possível pois a pesquisa é recente e abrange os principais estados industrializados da Federação, o que permite vislumbrar o porte do problema a ser enfrentado. São coletadas 3.736.073 toneladas por ano de resíduos industriais perigosos e 82.747.991 toneladas por ano de resíduos não perigosos.

Diante do panorama apresentado, embora muita coisa tem sido feita, existe um longo caminho a percorrer em relação à gestão dos resíduos sólidos no país.

### **2.3. CONSTRUÇÃO CIVIL**

A indústria da construção é a base da sustentabilidade, que significa a preservação do meio ambiente através da utilização dos recursos naturais de forma racional e econômica em prol da sociedade. Diante do avanço do déficit habitacional a construção de novas moradias e de todo tipo de infra-estrutura torna-se inevitável.

Segundo JOHN (2006) a construção transforma o meio ambiente e ao mesmo tempo destrói. Ela consome até 75% dos recursos naturais e gera aproximadamente

500kg/hab/ano de resíduos (mais do que o resíduo urbano). O custo social do resíduo de construção em São Paulo é de 1500 habitações por ano.

A construção constitui 30% dos negócios na Europa, 22% nos Estados Unidos, 21% no Japão e 23% nos países em desenvolvimento. As edificações, durante a sua vida, consomem 50% de energia elétrica, 21% de água e impermeabilizam o solo (JOHN, 2006).

A utilização de resíduos na construção pode gerar inúmeros benefícios, tais como: redução no consumo de recursos naturais não renováveis, redução das áreas destinadas para aterros, redução no consumo de energia e da poluição durante o processo de produção, destacando-se a produção de tijolo prensado a frio.

Na reciclagem de um resíduo a escolha do método deve ser criteriosa e ponderar todas as alternativas possíveis com relação ao consumo de energia e de matéria-prima durante o processo escolhido.

### **2.3.1. Tijolo de solo-cimento**

Tijolo ecológico, tijolo estrutural ou tijolo de encaixe são algumas das denominações utilizadas atualmente para definir uma tecnologia milenar. Não precisa ser cozido, é auto encaixável, e dispensa acabamento. É uma alternativa ao tijolo comum, pois não polui a atmosfera e diminui o desmatamento.

Além da importância ecológica, os aspectos econômicos, como o consumo mínimo de formas, ferragens e argamassas, e a ausência de quebras para embutir as instalações devem ser avaliados para que os tijolos sejam utilizados para construções de baixa renda e assim diminuir o déficit habitacional no nosso país.

A utilização de LETA na fabricação de tijolo de solo-cimento traz benefícios:

- ✓ à concessionária de serviços de saneamento, por esta ser uma solução definitiva,
- ✓ ao meio ambiente pela redução da supressão da vegetação devido a atividade extrativa,
- ✓ pela minimização da emissão de fluoretos nas olarias,
- ✓ pela redução da poluição aquática causada pelo lançamento de LETA nos corpos d'água.

Apesar disso, as experiências com o aproveitamento resíduos na construção civil têm mostrado que muitas iniciativas na área ambiental não chegam à resolução dos problemas pela falta de articulação entre os setores envolvidos.

## **2.4. RECURSOS NATURAIS**

As atividades de extração mineral cumprem um papel importante no desenvolvimento social e econômico, gerando empregos e movimentando o mercado da construção civil, mas são responsáveis por impactos ambientais muitas vezes irreversíveis. A produção desses materiais é imprescindível em qualquer parte do mundo, portanto, é necessária a busca de aperfeiçoamento para sua extração de forma a conseguir integração, sem ferir a paisagem e o meio ambiente.

### **2.4.1. Cimento**

A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. A denominação cimento é originada do latim caementu, que na velha Roma significava uma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. Uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado já era empregada nas construções dos imponentes monumentos do Egito. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu , foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das

proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água.

Em 1756 o inglês John Smeaton deu um passo importante para o desenvolvimento do cimento , quando obteve um material de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Resultados semelhantes foram obtidos em 1818 pelo francês Vicat, considerado o inventor do cimento artificial através da mistura de materiais argilosos e calcários. A queima de pedras calcárias e argila, em 1824, pelo construtor inglês Joseph Aspdin originou um pó fino, cuja mistura, após secar tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções e não se dissolvia em água. No mesmo ano o construtor patenteou o produto com o nome de cimento Portland , que recebeu esse nome por apresentar características semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland.

Em 1888 o comendador Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica em sua fazenda em Santo Antônio, Estado de São Paulo, dando início a aplicação de conhecimentos relativos à fabricação do cimento Portland no Brasil. Logo após, várias iniciativas para fabricação de cimento, como na ilha de Tiriri , na Paraíba e em Cachoeiro do Itapemirim, no Espírito Santo foram desenvolvidas, porém não passaram de meras tentativas que culminaram, em 1924, com a implantação pela Companhia Brasileira de Cimento Portland de uma fábrica em Perus, Estado de São Paulo, considerada como o marco da implantação da indústria brasileira de cimento. As primeiras toneladas foram produzidas e colocadas no mercado em 1926. Até então, o consumo de cimento no país dependia exclusivamente do produto importado. A produção nacional foi gradativamente elevada com a implantação de novas fábricas e a participação de produtos importados oscilou durante as décadas seguintes, até praticamente desaparecer nos dias de hoje.

O cimento Portland é o segundo item mais utilizado pelo ser humano e é formado de uma mistura de até 80% de calcário e de até 20% de argila, além da areia e minério de ferro como corretivos. Com o crescimento econômico houve a criação de grandes grupos fabricantes de cimento Portland em todo mundo.

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (Snic) o consumo de cimento no mercado interno foi recorde no ano de 2007, com 44,65 milhões de toneladas. A perspectiva para o ano de 2008 é que esse volume seja superado por causa da demanda aquecida tanto para construção de imóveis habitacionais como para obras de infra-estrutura ligadas ao (PAC) Programa de Aceleração do Crescimento (Sinduscon, 2008).

A fabricação de cimento Portland produz impacto ao meio ambiental tanto pela queima de combustível para a clínquerização, quanto pela liberação de CO<sub>2</sub> pela decomposição da calcita contida no calcário. No total, cada 1 tonelada de cimento produzida, libera de (0,85 a 1,1) toneladas de CO<sub>2</sub> dependendo do combustível e da eficiência do processo, e consome cerca de (0,30 a 0,35) toneladas de argila (solo).

Para minimizar os impactos ambientais as indústrias vêm empregando a técnica de co-processamento que utiliza combustíveis alternativos com fonte no processo de fabricação.

#### **2.4.2. Argila**

A extração de argila, embora não seja considerada uma atividade poluidora, degrada o meio ambiente, pois devasta as matas e causa assoreamento dos rios. O grande desafio é a exploração do solo sem, contudo, exauri-lo.

Segundo SPINELLI (2007), cerca de 15% do solo no mundo encontra-se degradado. Estima-se que mais de 100 milhões de hectares do solo brasileiro esteja degradado

em decorrência de processos erosivos provenientes de empreendimentos modificadores do meio ambiente, como desmatamento, exploração agrícola, grandes obras civis, expansão de áreas urbanas e exploração mineral.

### **2.4.3. Cal Hidratada**

Segundo GARAY (2006) os primeiros vestígios de produção industrial da cal surgem no Egito, cerca de 3.000 anos AC. As famosas pirâmides foram construídas com grandes blocos de calcário, ligados entre si por cimento constituído por uma mistura de cal e gesso. Os Maias e Incas também utilizaram essa tecnologia na execução das suas obras monumentais. Os Romanos desenvolveram as primeiras grandes aplicações de cal em geotecnia. Ao longo dos séculos, a cal, devido as suas características, assume importância extraordinária em várias atividades industriais.

O processo de fabricação de cal inicia-se na jazida de calcário. A rocha é desmontada por meio de explosivos e transportada até o britador, onde a rocha é transformada nas dimensões adequadas para a próxima etapa do processo. As pedras são transportadas para o forno, principal equipamento do processo, onde ocorre a reação mais importante durante a calcinação que é a descarbonatação do calcário. Este processo se dá por meio da ação do calor que é obtido no forno através da queima de vários tipos de combustíveis. O produto obtido nesta etapa, a cal virgem em pedra, poderá seguir caminhos distintos sendo um para a produção de cal virgem em pó ou um outro para a produção da cal hidratada.

A cal hidratada é composta basicamente de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e outros compostos de menor importância, provenientes da cal virgem, que por sua vez são oriundos principalmente da rocha calcária, onde a concentração de cada um destes compostos esta diretamente ligada com a composição química do calcário.

A cal é largamente utilizada na construção civil e em outros setores com funções hidrolizante, absorvente, floculante, caustificante e outras.

#### **2.4.4. Areia**

Não importa a tecnologia utilizada, a extração de areia é sempre uma atividade danosa ao meio ambiente. Segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia (2006), atualmente, 90% da produção nacional de areia é obtida a partir da extração em leitos de rios e é da ordem de 155 milhões de metros cúbicos ao ano. A extração de areia obtida nos rios causa impactos sobre o meio ambiente, em consequência da retirada da cobertura vegetal, das modificações na estrutura do solo, da interferência na fauna, da compactação do solo e da instabilidade de margens e taludes. Por isso, esta atividade tem sido coibida pelos órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente e pelo IBAMA, visto que a exploração de areia é praticada em locais próximos dos grandes centros urbanos. Com a exaustão das áreas próximas, os mineradores são forçados a extrair areia em locais cada vez mais distantes do mercado consumidor, o que onera o preço final do produto.

### **2.5. CONSUMO DE ENERGIA**

A conservação de energia é e será cada vez mais uma questão de suma importância, principalmente para os países em desenvolvimento onde há sempre a perspectiva de retomada do crescimento econômico, o que pressupõe e requer a disponibilidade de energia abundante. É preciso assim, procurar alternativas que viabilizem o reinício do crescimento sem a necessidade de um aumento insustentável da demanda de energia.

Ou seja, devemos pensar numa estratégia de desenvolvimento com baixo perfil de consumo de energia e que satisfaça ao mesmo tempo os critérios de viabilidade econômica, utilidade social e que esteja em plena harmonia com o meio ambiente.

Tal estratégia deve se basear no uso de combustíveis renováveis/abundantes (bio-diesel, resíduos orgânicos, etc) ou numa ampla política de conservação de energia, envolvendo além das várias providências discutidas anteriormente, a reestruturação do sistema de consumo através da concepção de produtos obtidos por tecnologias de reduzido aporte de energia. Ou seja: a redução da energia consumida na produção, operação e conservação dos produtos, assim como o aumento de sua vida útil.

## **2.6. DÉFICIT HABITACIONAL**

O déficit habitacional brasileiro atingiu 7,964 milhões de residências em 2006, segundo estudo realizado pela FGV (Fundação Getulio Vargas), com base nos dados da Pnad (Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

O estudo aponta que o déficit relativo (número de casas existentes dividido pelo de casas necessárias para suprir a demanda) atingiu 14,6% - um recuo de 0,3 ponto percentual em relação ao ano de 2005.

Em termos absolutos, os estados com os maiores déficits são São Paulo (1,517 milhão), Rio de Janeiro (752 mil) e Minas Gerais (632 mil). Em termos relativos, os maiores déficits estão no Maranhão (38,1%), Amazonas (33,7%) e Pará (33,5%). Os menores déficits relativos estão em Santa Catarina (8,8%), Paraná (8,9%) e Espírito Santo (9,8%).

Ainda segundo o estudo 93,1% do déficit atual encontra-se em famílias com renda mensal de até 5 salários mínimos.

O estudo mostra que, do total do déficit, 59% referem-se a domicílios considerados "subnormais", sendo que São Paulo e Rio de Janeiro são os estados que reúnem a maior parte das habitações nessa categoria.

O IBGE considera subnormal o "conjunto constituído por um mínimo de 51 unidades habitacionais, ocupando ou tendo ocupado, até período recente, terreno alheio, disposto, em geral, de forma desordenada e densa e carentes, em sua maioria, de serviços públicos essenciais". O número de domicílios desse tipo no país hoje é de 1,972 milhão.

## ***CAPÍTULO 3 - ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA)***

### **3.1. PANORAMA ATUAL**

Neste capítulo estão apresentados os conceitos técnicos mais relevantes sobre o LETA (Lodo de Estação de Tratamento de Água) que completam e justificam a pesquisa.

Os sistemas de tratamento de água compreendem desde o manancial de abastecimento, a captação, a estação de tratamento e a distribuição de água potável (WIECHETECK e CORDEIRO, 2002). E como uma indústria de transformação, uma estação de tratamento de água (ETA) transforma a matéria-prima (água bruta) retirada da natureza, em produto final (água potável), ocorrendo neste processo a geração de resíduos que geralmente retornam ao meio ambiente de maneira inadequada.

No Brasil, o tratamento dos resíduos gerados em sistemas de potabilização de água tem-se limitado apenas a algumas estações de tratamento. Apenas nos últimos anos o assunto tem recebido atenção no Brasil, enquanto nos Estados Unidos da América e em certos países da Europa este vem sendo estudado extensivamente a partir da década de 70 (FERREIRA FILHO e SOBRINHO et al, 1998). No Brasil existem cerca de 7.500 ETA's que geram seus resíduos nos decantadores e nos filtros e lançam nos cursos d'água (SOUZA, 2006).

### **3.2. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CUBATÃO**

Segundo a CETESB (2002) a construção da estação de tratamento de água de Cubatão iniciou em 1960, porém, começou a funcionar em 1963, com a capacidade de tratamento de 1,0m<sup>3</sup> /s. Após a 2ª etapa da construção em 1969, sua capacidade duplicou. Em 1985, após passar por reforma geral, sua capacidade foi ampliada. No início do século XXI sua capacidade chegou a 4,0m<sup>3</sup> /s.

A matéria-prima, água bruta, é retirada do Rio Cubatão pela barragem Sul-Alvea, 1.100m a montante das estações de descarga da Usina Hervy Borden. Assim que a matéria-prima, 4.000 litros de água bruta, chega à indústria inicia-se o processo de tratamento para se obter água potável.

A maior parte do resíduo gerado nas estações de tratamento de água (ETA's) do estado de São Paulo é lançada nos leitos dos rios mais próximos, causando problemas ambientais, tais como aumento da parte sólida em suspensão, assoreamentos indesejáveis, mudanças de cor, altas concentrações de alumínio, etc.

Em 2001, das 894 amostras coletadas nos 149 pontos da rede de monitoramento da qualidade de águas no interior do Estado de São Paulo, operada pela CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 91,1% apresentaram concentrações de alumínio superiores às estipuladas pela legislação ambiental brasileira (CETESB, 2002).

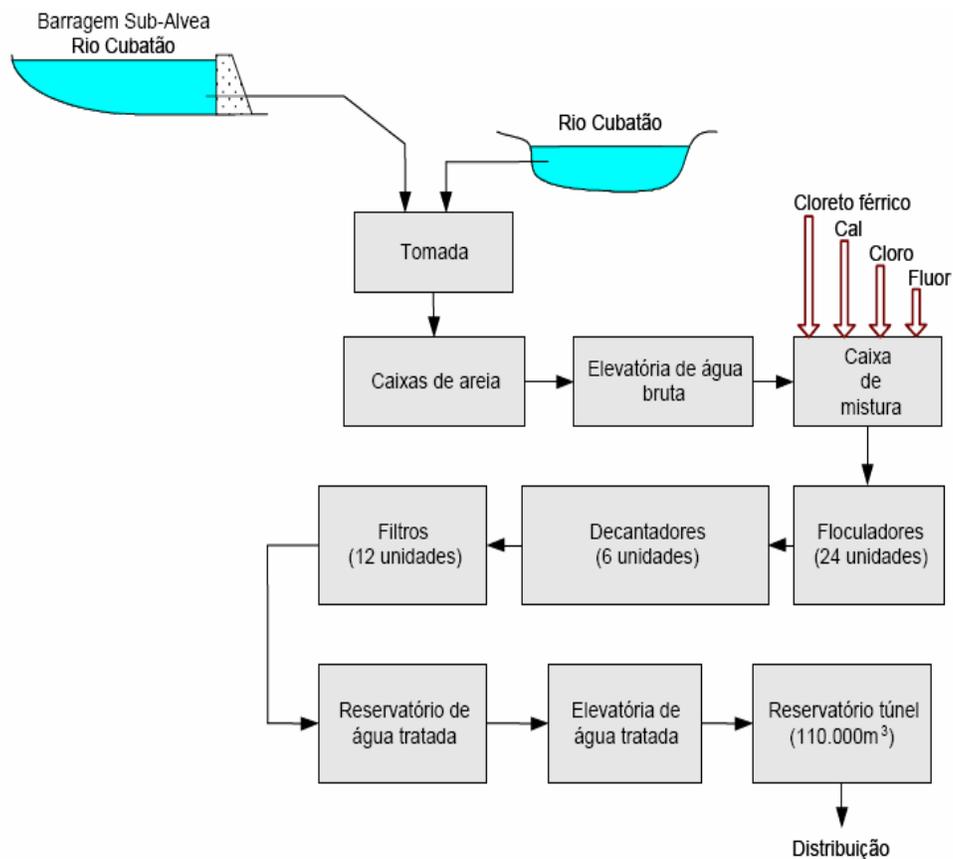
Nos últimos cinco anos, principalmente após a Resolução nº 307 do CONAMA, a CETESB, ligada à Secretaria de Meio Ambiente de São Paulo, tem intensificado a fiscalização sobre a disposição dos resíduos das ETA's, tanto no lançamento nos rios, quanto nos aterros sanitários e nas estações e tratamento de esgoto (ETE's ), pois não atendem a legislação vigente. Mesmo com aumento da fiscalização, São Paulo, assim como as grandes cidades, enfrenta problemas de escassez de aterros sanitários, falta de conhecimentos para gerenciá-los e alto custo para disposição final, o que leva as concessionárias de saneamento a buscarem alternativas para a solução do problema.

A reciclagem do lodo proveniente dos decantadores e filtros no processo de tratamento da água é importante para amenizar a falta de estrutura dos grandes centros e os problemas causados ao meio ambiente. A utilização do LETA na

confeção de elementos construtivos de baixo custo para construção de habitações populares é importante para minimizar outro problema sério em nosso país, o déficit habitacional.

### 3.2.1. Processo de Tratamento da Água

Segundo a CETESB (2002) a ETA de Cubatão é uma unidade do tipo clássica (Figura 3.1) compreendendo o seguinte processo de tratamento:



**Figura 3.1**– Fluxograma do processo de tratamento de água da ETA de Cubatão  
Imagem fornecida pela CETESB

## **1 - Coagulação**

Na água bruta, além de partículas sedimentáveis, existem impurezas que se encontram em suspensão fina, estado coloidal ou suspensão (bactérias, protozoários e plâncton). A coagulação ocorre por meio de trocas físico-químicas que ocorrem entre o coagulante e o alcalinizante, para formar um precipitado. Como consequência, ficarão desestabilizados os colóides de água bruta, reduzindo ou neutralizando sua carga elétrica. Assim, as partículas coloidais estarão prontas para serem agrupadas pela força mecânica dos flocladores.

O coagulante utilizado na ETA Cubatão é o cloreto férrico líquido, que é adicionado à água bruta, na Caixa de Mistura Rápida. O alcalinizante usado no processo é a cal virgem que, já hidratada, é bombeada para aplicação também na Caixa de Mistura Rápida. A reação entre o coagulante e o alcalinizante é rápida: ocorre em poucos segundos.

O cloreto férrico líquido e o ácido fluorsilícico são descarregados nos tanques de armazenamento correspondentes. Do tanque de armazenamento, o cloreto férrico é bombeado até os tanques intermediários, localizados no platô do morro, e de lá, por ação da gravidade, até o dosador de nível constante localizado na Casa de Química, onde - após estabelecida a dosagem necessária - flui até a aplicação na Caixa de Mistura Rápida. Já o ácido fluorsilícico é recalcado do tanque de armazenamento pela bomba dosadora e aplicado - já dosado - também na Caixa de Mistura.

A água bruta, após receber esses produtos químicos na Caixa de Mistura Rápida, flui por uma tubulação de 1,5 metro de diâmetro até o sistema de flocladores e decantadores. A quantidade média diária de produtos químicos consumidos na ETA de Cubatão é de 24 toneladas por dia de cloreto férrico líquido a 40%, e de 1 tonelada/dia de ácido fluorsilícico.

## **2 - Flocculação**

Após a coagulação, as partículas coloidais estão prontas para serem agrupadas pela força mecânica dos flocculadores.

Os flocculadores estão equipados com unidade de acionamento para transmitir energia à água, mantendo-a num movimento de turbulência relativamente suave. Conforme a água em processamento passa pelos flocculadores, as partículas de impurezas colidem com as partículas sólidas e, aderindo umas às outras, aumentam de tamanho e densidade. O volume de cada câmara corresponde a 210 m<sup>3</sup>. O tempo de retenção nos flocculadores é de aproximadamente 25 minutos, condicionando a água para o processo de decantação.

## **3 - Decantação**

Após a flocculação, a água tem um aspecto em que são evidentes os flocos formados pela agregação das impurezas. A decantação é o processo de separação e remoção das partículas de impurezas, preparando-a para uma eficiente filtração.

A separação entre o decantador e o flocculador é feita por uma cortina de madeira ou difusor, evitando-se assim que se propague para o decantador a turbulência criada no flocculador. Obtém-se, com isto, um movimento laminar com velocidades baixas, permitindo que os flocos assentem bem, antes da água verter na extremidade contrária dos decantadores.

Os flocos, ao se depositarem, formam uma camada de lodo que é sedimentada no fundo dos decantadores. Para a remoção do lodo sedimentado, os decantadores são lavados periodicamente, obedecendo uma frequência média de 42 dias.

## **4 - Filtração**

É o processo que permite remover as frações de partículas sólidas suspensas na água que fluem para os filtros através dos vertedouros.

A ETA de Cubatão possui 12 filtros convencionais, de tripla camada (pedra, areia e antracito). Esses filtros são assim classificados pelo fato da água ser processada por

gravidade através do meio filtrante e daí, pelo sistema efluente, para o reservatório da ETA.

Cada filtro é formado por duas câmaras com 115 m<sup>2</sup> de área filtrante. A taxa de filtração média é de 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d (200 metros cúbicos por metro quadrado por dia). Os filtros usam dois tipos de materiais como meio filtrante: uma camada de areia e uma de antracito. A areia, sendo mais pesada, assentará mais rápido que o antracito, ao final de um período de lavagem contra-corrente. Assim, o leito de antracito está sempre no topo do leito de areia.

A lavagem contra-corrente do filtro é efetuada aproximadamente a cada 20 horas, sendo determinada em função da turbidez e perda de carga. O tempo de duração da lavagem é de cerca de 15 minutos.

## **5 - Fluoretação**

Fluoretação das águas é o processo pelo qual são adicionados compostos de flúor às águas de abastecimento público, a fim de que tenham teor adequado de íon fluoreto para proporcionar o máximo de benefício na redução da cárie dentária. Este teor varia de um local para outro, de acordo com o clima da região.

O objetivo da fluoretação é dar aos dentes, enquanto se processa o seu desenvolvimento, a obtenção de um esmalte mais resistente e de superior qualidade, reduzindo o índice de cárie dentária.

Devido às qualidades químicas e ao custo de aquisição, a Sabesp usa o Ácido Fluorsilícico para a fluoretação das águas. A dosagem de íon fluoreto colocado na água tratada da estação é de 0,7 ppm (mg/l).

## **6 - Desinfecção**

A desinfecção consiste na destruição de microorganismos patogênicos (capazes de produzir doenças) ou de outros compostos indesejáveis. Na ETA, usa-se o cloro, que é aplicado na água coagulada (pré-cloração) e na água filtrada (pós-cloração). A

dosagem de cloro para a água em processamento pode ter outros benefícios, além dos objetivos principais de desinfecção:

- ✓ Pode auxiliar na redução da cor no processo de coagulação.
- ✓ Pode reduzir o potencial para a criação de condições sépticas do lodo depositado.
- ✓ Pode reduzir e controlar o crescimento de matérias orgânicas no meio filtrante e nas paredes dos decantadores.

Por estas razões, o residual de cloro livre é mantido através do processo.

A pós-cloração tem a finalidade de proteger a água contra possíveis contaminações no sistema de distribuição.

Na ETA-Cubatão usa-se o cloro líquido fornecido em cilindros com capacidade de 900kg. O cloro líquido é transformado para o estado gasoso através dos evaporadores instalados na Casa de Química, para ser dosado por cloradores. O gás cloro é misturado na água tratada e aplicado nos diversos pontos do processo sob a forma de água clorada.

### **3.3. MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO FINAL DO LETA**

Com a proibição do lançamento do LETA nos corpos d'água, muitos países desenvolveram métodos para reduzir os volumes a serem dispostos, tratar e reciclar os rejeitos. Entre os métodos utilizados para melhorar as características do LETA, antes da disposição final, destaca-se a desidratação natural ou mecanizada. A desidratação natural é um procedimento simples onde o resíduo é colocado em lagoas e leitos para secagem em condições ambiente (Figuras 3.2, 3.3 e 3.4). Para desidratação mecanizada utilizam-se equipamentos para reduzir a quantidade de água do resíduo, o que implica em redução de tempo e da área para secagem do LETA.

Na Europa os LETA's são dispostos em aterros sanitários e áreas agrícolas e utilizados no reflorestamento e no controle de sulfetos em sistema de tratamento de esgoto. No Japão, devido à falta de área apropriada para disposição do LETA, estes

resíduos são comumente incinerados. Processo também muito usado nos Estados Unidos (SOUZA, 2006).



**Figura 3.2** – Leito de Secagem do LETA (SABBAG e MORITA, 2002)



**Figura 3.3** – Leito de Secagem, carregamento do LETA (SABBAG e MORITA, 2002).



**Figura 3.4 – Lodo após Secagem (SABBAG e MORITA, 2002)**

Atualmente os principais métodos para disposição do LETA são: disposição em aterros, aplicação no solo, lançamento em ETE's ou diretamente nos corpos d'água, incineração e disposição oceânica.

A técnica de disposição do resíduo em aterros sanitários apresenta vantagens sobre outros métodos, como a incineração e a compostagem, que exigem grandes investimentos para sua construção, operação e manutenção (SOUZA, 2006). O LETA a ser disposto em aterro sanitário (figura 3.5) deve conter de 15 a 30% de sólidos secos. No caso do LETA, rico em alumínio, exige-se que o teor de sólido seja de, no mínimo, 25%.



**Figura 3.5** – Disposição do LETA em Aterro Sanitário (SABBAG e MORITA, 2002)

O LETA pode ser utilizado como fertilizante, desde que a concentração de alumínio seja menor que 25% em massa. O resíduo melhora as características do solo na retenção de água, no entanto, a taxa tem que ser controlada pois tanto o ferro quanto o alumínio se combinam com o fósforo, reduzindo sua absorção pelas plantas (SABBAG e MORITA, 2002).

A principal vantagem da incineração é a redução do volume do resíduo, pois as cinzas decorrentes da incineração representam cerca de 20% do seu volume total. Este método tem crescido nos países desenvolvidos devido à dificuldade de construção de novos aterros sanitários (SABBAG e MORITA, 2002).

A disposição oceânica é um método inadequado ambientalmente. O lançamento em emissários submarinos ou nos leitos dos rios prejudica a qualidade da água, tornando-a mais tóxica por conta da presença de alumínio e podendo ocasionar mudança de cor (SABBAG e MORITA, 2002).

O lançamento em ETE's representa apenas uma transferência do problema já que estes também precisam ser dispostos.

### 3.3.1. Métodos de Disposição do LETA em outros países

Nos EUA, segundo CORNWELL et al (2000), o lodo das ETA's são dispostos de acordo com a figura 3.6.



**Figura 3.6** – Disposição do lodo das ETA's nos EUA (CORNWELL et al, 2000)

Na França, segundo ADLER (2002) 96% das 26.680 ETA's captavam água subterrânea e apenas 4% possuíam manancial superficial. A maioria das ETAs francesas são de pequeno porte (vazão inferior a 500 m<sup>3</sup>/h) e a produção de lodo em 384 ETA's é de 175 t/dia. Quanto à disposição final dos lodos, 30% lançavam em sistemas públicos de esgotos, 13% dispunham em aterros sanitários, 6% aplicavam os lodos no solo e 53% possuíam outras formas de disposição, entre elas compostagem, construção de diques e incorporação em materiais de construção civil.

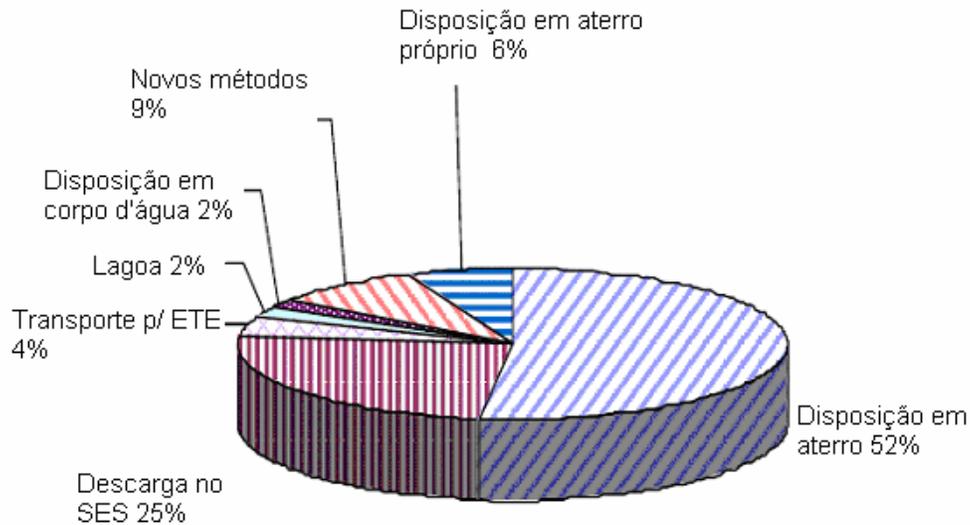
Segundo PAULSRUD et al (2002), na Noruega, as formas de disposição usuais de lodos de ETA's são: descarga nos corpos d'água; descarga nos sistemas públicos de

esgotos; aterros sanitários; recuperação de produtos químicos; co-disposição com lodos de estações de tratamento de esgotos e aplicação no solo.

Até recentemente, os lodos das ETA's norueguesas ou eram descarregados nos corpos d'água diretamente ou em sistemas públicos de esgotos. Esta última solução era aplicada no caso de ETA's localizadas próximas às estações de tratamento de esgotos que tivessem condições de receber os lodos. No entanto, este quadro tem sido alterado devido à crescente deterioração da qualidade da água bruta (problemas de gosto e odor) e ao impacto das descargas de lodos de ETA's nos corpos d'água receptores (baixo pH, altas concentrações de alumínio). A disposição em aterros tem sido abandonada por imposição de recente legislação europeia, que proíbe este tipo de prática. A quantidade de lodo produzido nas ETA's da Noruega é pequena e não torna a recuperação de coagulantes uma alternativa economicamente viável. Portanto, o enfoque tem sido na aplicação no solo e nos usos benéficos.

Segundo Sombekke; Koppers (1992) apud Horth et al. (1994), em 1989, 2% dos lodos gerados em ETA's holandesas eram descarregados diretamente nos corpos d'água, 51% encontravam-se estocados, 37% eram dispostos em aterro sanitário, 7% eram usados para controle de gás sulfídrico e 12% na agricultura. O controle do gás sulfídrico era realizado descarregando diretamente o lodo no sistema de coleta de esgotos (2 casos), transportando o lodo e introduzindo-o nos digestores ou nos lavadores de gases das ETE's (12 casos) e inserindo o lodo em uma estação de tratamento de águas residuárias de um curtume. A razão pela qual grande quantidade de lodo encontrava-se estocada era o alto teor de arsênio presente no mesmo (maior do que 50 mg/kg de sólidos secos).

No Reino Unido, segundo SIMPSON et al (2002), o lodo das ETA's são dispostos de acordo com a figura 3.7.



SES – Sistema de Esgoto Sanitário

**Figura 3.7** – Método de disposição do LETA no Reino Unido (SIMPSON et al, 2002)

### 3.3.2. Propostas para disposição do LETA de Cubatão

Para disposição final do lodo gerado diariamente (25t) na Estação de Tratamento de Água de Cubatão foram avaliadas as seguintes alternativas: incineração, disposição em aterros sanitários e lançamento em ETE's (SABBAG e MORITA, 2002).

Após avaliação das alternativas, a incineração mostrou-se economicamente inviável. O gasto diário com a incineração, sem considerar o transporte do resíduo, seria de aproximadamente R\$ 144.000,00.

Após um inventário sobre disposição de resíduos sólidos em importantes cidades da Baixada Santista, constatou-se que a maioria dos aterros são inadequados e estes são escassos. Esta alternativa mostrou-se inviável a curto prazo. Para dispor o LETA de Cubatão em um destes aterros a Sabesp deveria despendar R\$ 5.200,00/dia.

Após levantamento percebeu-se que em vários municípios da Baixada Santista a coleta do esgoto é menor que 25%. Portanto, a curto prazo, não seria possível lançar o resíduo nestas ETE's.

### **3.4. IMPACTOS AMBIENTAIS**

O lançamento irregular do LETA em cursos d'água provoca a redução de oxigênio dissolvido pela decomposição da matéria orgânica contida neste resíduo e, ainda, faz aumentar a concentração de alumínio no corpo receptor pelo fato de grande parte das ETA's utilizarem o sulfato de alumínio como coagulante (SOUZA, 2006). A presença de alumínio no corpo humano pode acarretar várias disfunções neurológicas, inclusive o mal de Alzheimer.

A qualidade das águas dos rios brasileiros está longe de alcançar patamares ideais. O diagnóstico é do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e consta da terceira edição do relatório dos Indicadores de Desenvolvimento Sustentável - IDS (IBGE, 2008). De acordo com o levantamento, nenhum rio ou represa do país alcançou a classificação ótima no Índice de Qualidade da Água (IQA). Os resultados referentes à área ambiental apresentam indicadores mais negativos ou em evolução lenta.

Os resultados mais preocupantes em relação à qualidade da água, segundo o IBGE (2008), foram registrados no rio Tietê, em São Paulo, rio Iguçu, na região metropolitana de Curitiba (PR), e rio das Velhas, que corta Belo Horizonte. A situação também é crítica na bacia do Paraguaçu, que banha a região do Recôncavo Baiano e no Rio Ipojuca, em Pernambuco.

De acordo com o IBGE (2008) a contaminação por resíduos domésticos e industriais já começa a provocar escassez de disponibilidade de água de qualidade mesmo em áreas com abundância de recursos hídricos.

### **3.5. ASPECTOS LEGAIS**

Embora as características do LETA sejam, ainda, pouco conhecidas e difundidas diante dos aspectos legais vigentes, os responsáveis pelo lançamento desses rejeitos em corpos d'água devem analisar criteriosamente alguns aspectos para que, em um futuro próximo, não sejam enquadrados criminalmente.

A Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre Política Nacional de Meio Ambiente, deu legitimidade ao Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e aos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente.

Em 12 de fevereiro de 1998, foi promulgada a Lei nº 9.605, chamada “Lei da Vida” ou “Lei dos Crimes Ambientais”, que em seu capítulo V “ Dos crimes contra o Meio Ambiente”, na Seção III “Da Poluição e outros Crimes Ambientais” , no artigo 54 define como crime ambiental : “Causar poluição de qualquer natureza que resulte ou possa resultar dano à saúde humana, ou que provoque morte de animais ou a destruição significativa da flora”, e no parágrafo 2º , inciso 5º, prescreve: “ Se o crime ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos....em desacordo com exigências estabelecidas em leis e regulamentos, a pena prevista é de reclusão de um a cinco anos (BRASIL, 1998).

O Decreto-Lei nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, nos artigos 3º e 4º , estabelece as condições gerais sobre poluição, e, no artigo 19-B, em parágrafo único consta:” Os lodos provenientes das fontes de poluição industrial, bem como o material proveniente de limpeza de fossas sépticas, a critério e mediante a autorização expressa da entidade responsável pela operação do sistema, poderão ser recebidos pelo sistema público de esgotos, entretanto fica proibida sua disposição em galerias de águas pluviais ou em corpos de água” (SÃO PAULO, 1976).

## **3.6. ALTERNATIVAS PARA TRATAMENTO E RECICLAGEM DO LETA**

### **3.6.1. Incorporação em Blocos Cerâmicos**

A alternativa de incorporação do LETA na fabricação de blocos cerâmicos vem sendo pesquisada em várias Estações de Tratamento de Água e algumas estão descritas abaixo.

#### **3.6.1.1. ETA de Campos dos Goitacazes / RJ**

A ETA da região de Campos dos Goytacazes-RJ é responsável por cerca de 80% da água tratada do município, capta água na Bacia do Paraíba do Sul, gerando enorme quantidade de resíduo na forma de um lodo. Este resíduo vem sendo lançado no Rio Paraíba do Sul, contribuindo para seu assoreamento (OLIVEIRA et al, 2004).

Foram estudadas as características mineralógicas e físico-químicas do resíduo visando seu aproveitamento como matéria-prima na indústria de cerâmica vermelha. Foram realizados ensaios de caracterização tais como análise química, difração de raios X, análise termogravimétrica e térmica diferencial, análise morfológica, granulometria, capacidade de troca catiônica e propriedades plásticas.

O resíduo utilizado foi coletado na ETA na forma de lodo. Foi então homogeneizado e submetido a processo de secagem em estufa por 24 h. Em seguida o resíduo seco foi destorroado e peneirado para a fração < 40 mesh constituindo-se na amostra de trabalho.

Concluiu-se que o resíduo é plástico (IP = 20%), rico principalmente em SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e constituído de caulinita, mica, sílica e gibsita, com predominância de caulinita. Devido ao alto valor do limite de plasticidade do resíduo, recomenda-se que seja utilizado em cerâmica vermelha somente como constituinte de formulações argilosas adicionado em quantidades adequadas.

### **3.6.1.2. ETA de São Leopoldo / RS**

O trabalho foi realizado através de um convênio entre a Universidade do Vale do Rio Sinos – UNISINOS e o Serviço Municipal de Água e Esgoto de São Leopoldo / RS – SEMAE (SANTOS et al, 2001).

O objetivo do estudo foi caracterizar o resíduo de ETA / SEMAE e analisar a viabilidade de seu uso como matéria prima na confecção de elementos cerâmicos para construção civil.

Através da caracterização do risco ambiental, classificou-se o lodo como classe II – não inerte. O ensaio de lixiviação não apresentou características de periculosidade e não é patogênico.

A análise química demonstrou que o resíduo apresenta composição química semelhante à da argila. Esta conclusão é reforçada através de resultados da caracterização mineralógica por difração de raio X.

Após a realização de diversos ensaios conclui-se que o resíduo pode ser aproveitado como matéria prima para construção civil.

### **3.6.1.3. ETA de Cubatão / SP**

O objetivo do trabalho foi aplicar metodologia de negociação de conflitos com a participação dos setores envolvidos para resolver definitivamente o problema de disposição do LETA - Cubatão.

Foi realizado um levantamento de dados no ponto de amostragem da ETA de Cubatão, referente a cinco anos, e uma comparação dos mesmos com os padrões de qualidade das águas de rios classe II. Tal levantamento teve por objetivo detectar os possíveis poluentes presentes no lodo e avaliar os prováveis impactos na produção de blocos cerâmicos.

Os resultados mostraram a possibilidade de incorporação de 12,5% do resíduo na produção de blocos cerâmicos em paredes retas (SABBAG e MORITA, 2002).

### **3.6.2. Considerações sobre o LETA**

O trabalho apresenta uma visão geral do problema de tratamento do resíduo de ETA e também propõe alternativas para tratar o resíduo dentro da própria estação de tratamento (FERREIRA FILHO e SOBRINHO,1998).

Algumas alternativas foram sugeridas, tais como:

- ✓ A concepção do sistema de tratamento do resíduo em função da caracterização da água bruta e dos produtos químicos utilizados no tratamento da água.
- ✓ Consideração sobre a recuperação da água de lavagem dos filtros em função do projeto da ETA.
- ✓ Execução de ensaios em laboratório e, se possível, em escala piloto da concepção do sistema de adensamento e escolha do polímero mais adequado para fins de pré-condicionamento dos despejos.
- ✓ Execução de ensaios para pré-seleção do polímero empregado no condicionamento do despejo visando a sua desidratação.
- ✓ Execução de ensaios para avaliar os equipamentos mais adequados para transporte e disposição final dos resíduos.
- ✓ Estudos e experimentos que objetivem criar alternativas técnica e econômica para confecção e projetos de um sistema de tratamento dos despejos da ETA e também para as já existentes.

### **3.6.3. Incorporação do LETA em Argamassa e Concretos**

O objetivo do trabalho foi utilizar o LETA de São Carlos/SP seco e moído e o entulho para produzir concreto estrutural de resistência moderada, concreto para contrapiso e

argamassa de assentamento (SOUZA, 2006). Para tal foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e de absorção de água.

A adição de até 4% em massa de LETA seco substituindo o agregado miúdo natural possibilitou a obtenção de concretos com características similares as dos concretos convencionais .

A produção de concretos e argamassa mostrou ser viável com relação à resistência à compressão axial e à absorção de água.

## **CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. MATERIAIS UTILIZADOS**

#### **4.1.1. Resíduo de Estação de Tratamento de Água**

O resíduo utilizado foi o Lodo gerado na Estação de Tratamento de Água de Cubatão, aqui denominado de LETA de Cubatão.

O LETA é composto de partículas de solo, material orgânico, subprodutos gerados da adição de produtos químicos e água. As partículas presentes na água a ser tratada são colóides que lhe confere cor e turbidez. Os colóides têm tamanho que varia de nanômetro a milímetro, característica que dificulta a remoção da água livre dos lodos (CORDEIRO, 2001).

De acordo com RICHTER (2001), o teor de sólidos totais presentes em um LETA varia de 1.000 a 40.000mg/l (0,1 a 4%) , dos quais, de 75 a 90% são sólidos suspensos e de 20 a 35% são compostos voláteis , uma pequena porção biodegradável que pode ser prontamente oxidável.

As características do LETA podem variar com o tipo de coagulante, com os auxiliares utilizados no processo, com a qualidade da água bruta e também em função da tecnologia usada no tratamento da água.

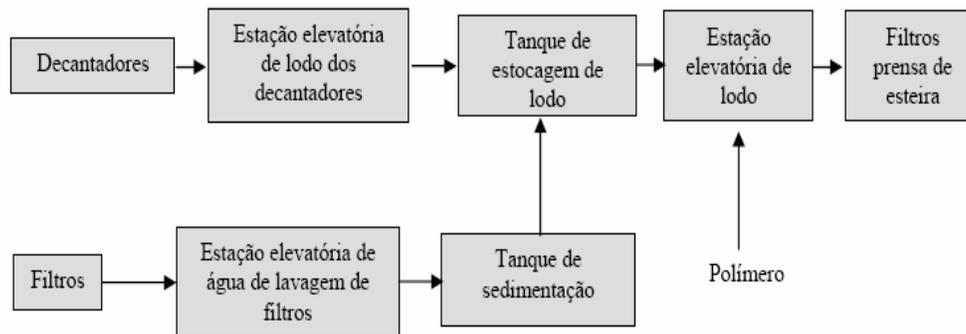
A quantidade de LETA gerado pela Sabesp é de 647 t/dia (base úmida), sendo que a ETA de Cubatão produz 70t/dia (teor de sólidos igual a 30%), ou seja, 25 t/dia (seco). O estado de São Paulo produz 55% da produção nacional do LETA (SAMPAIO, 2002).

#### 4.1.1.1. Processo de geração do LETA de Cubatão

Os lodos gerados na ETA de Cubatão têm sua origem nos decantadores e nos filtros.

Os primeiros são lavados a cada 40 a 45 dias e os últimos a cada 12 horas.

A água de lavagem dos filtros é bombeada para um tanque de sedimentação. Deste, os lodos sedimentados são encaminhados ao tanque de estocagem, juntamente com os provenientes dos decantadores. Nesse tanque, ocorre adensamento por gravidade dos lodos acumulados. A figura 4.1 apresenta um fluxograma do processo de tratamento de lodos da ETA.



**Figura 4.1** – Sistema de tratamento do LETA/Cubatão (SABBAG e MORITA, 2002)

Os lodos adensados são removidos pelo fundo e bombeados para 4 filtros prensas de esteira. Nesse momento, é adicionado polímero, previamente preparado, para auxiliar no processo de desidratação. Os lodos desidratados são conduzidos por uma esteira transportadora a uma caçamba receptora para disposição final.

Existem dois tipos de resíduo gerado nas estações de tratamento: lodo gerado pelo processo convencional e lodo proveniente do abrandamento da água.

O lodo gerado pelo processo convencional tem aparência gelatinosa e contém altas concentrações de alumínio ou sais de ferro, com misturas de materiais orgânicos, inorgânicos e precipitados de hidróxidos dos coagulantes. É produzido nas operações

de clarificação e na lavagem dos filtros. Sua desidratação é uma tarefa difícil. Atualmente, as ETA's recirculam as águas de lavagem dos filtros sem nenhum pré-tratamento.

O lodo proveniente do abrandamento da água contém principalmente carbonato de cálcio e precipitados de hidróxido de magnésio com algumas substâncias orgânicas e inorgânicas. Este lodo é de fácil desidratação.

#### **4.1.1.2. Características do resíduo**

O resíduo utilizado neste estudo foi fornecido pela CETESB situada em São Paulo. Após prévios contatos com a empresa, esta solicitou um estudo sobre o aproveitamento do resíduo, ficando responsável pela amostragem e coleta do resíduo de acordo com a NBR 1007 (ABNT, 1987) – Amostragem de Resíduos.

Foi então amostrado e enviado ao laboratório de Geotécnica da COPPE/UFRJ cerca de 50kg do resíduo, que foi utilizado primeiramente para ensaios exploratórios. Após a obtenção de resultados satisfatórios para confecção de elementos estruturais para construção iniciaram-se os ensaios propriamente ditos.

O resíduo foi utilizado, inicialmente, com a umidade natural, ou seja, igual a 199% (Figura 4.2). Devido aos resultados não satisfatórios, houve a necessidade de secagem gradativa do material.

Observou-se ao longo do estudo que o LETA, a partir de determinada umidade, criava grumos que dificultavam a mistura para confecção dos corpos de prova. Foi então feito um estudo de secagem para se conseguir este teor de umidade e garantir a trabalhabilidade do material. Inicialmente chegou-se a umidade igual a 100% (Figura 4.3). Depois foram atingidas as umidades iguais a 70% (Figura 4.4), 40% (Figura 4.5) e 30% (Figura 4.6). Após este teor de umidade (30%), tornou-se inviável a utilização

do material úmido. A partir daí a solução encontrada foi o destorroamento e secagem total do material (Figura 4.7 e 4.8) para se atingir maiores resistências.



**Figura 4.2** – Amostra do LETA (w=199%)



**Figura 4.3** – Amostra do LETA seco à temperatura ambiente (w =100%)  
(ampliação)



**Figura 4.4** – Amostra do LETA seco à temperatura ambiente ( $w = 70\%$ )



**Figura 4.5** – Amostra do LETA seco à temperatura ambiente ( $w = 40\%$ )



**Figura 4.6** – Amostra do LETA seco à temperatura ambiente ( $w = 30\%$ )

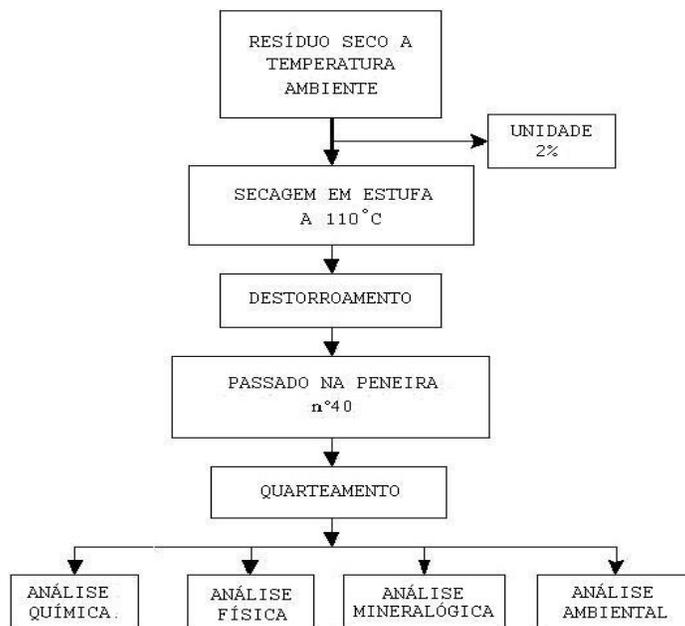


**Figura 4.7** – Amostra do LETA destorroado e seco à temperatura ambiente



**Figura 4.8** – Amostra do LETA destorroado e seco à temperatura ambiente  
(ampliação)

Para os ensaios de caracterização, as amostras foram preparadas de acordo com o fluxograma abaixo.



**Figura 4.9** - Fluxograma usado na preparação da amostra para os ensaios

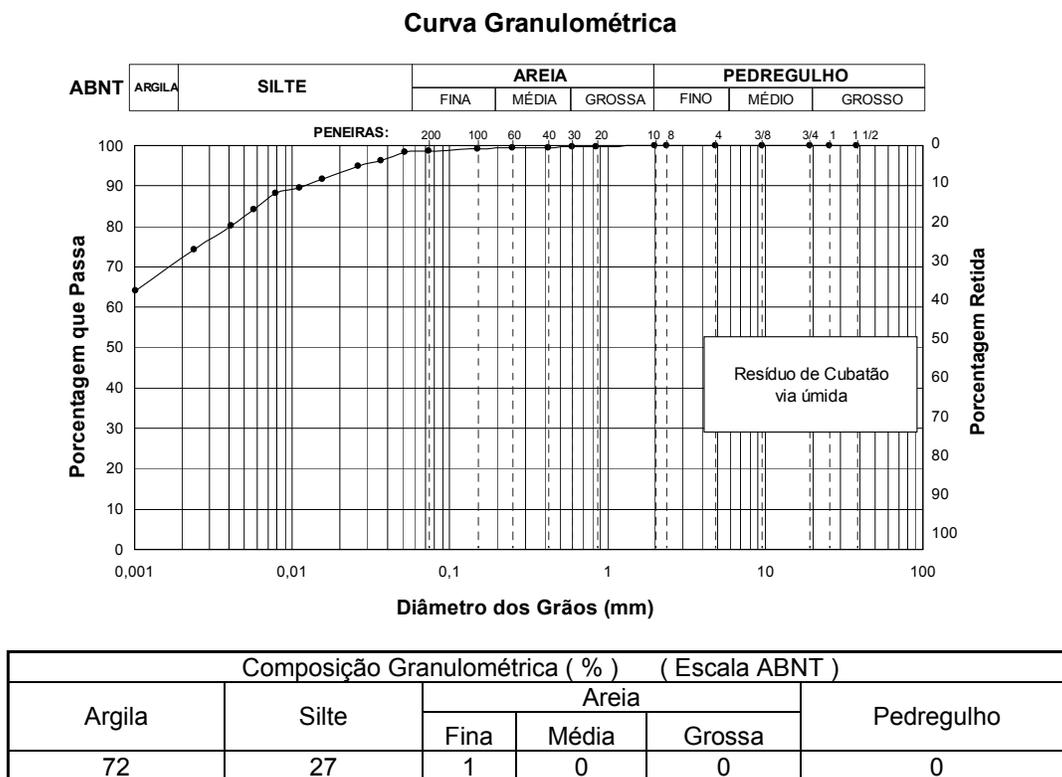
No exame preliminar de caracterização do resíduo, foram determinadas suas características físicas, químicas e mineralógicas, e efetuada a análise do seu potencial de contaminação ambiental através dos ensaios de solubilização e lixiviação.

Nos subitens seguintes são apresentados os resultados obtidos juntamente com os mais recentes encontrados na literatura.

#### 4.1.1.3 - Características Físicas

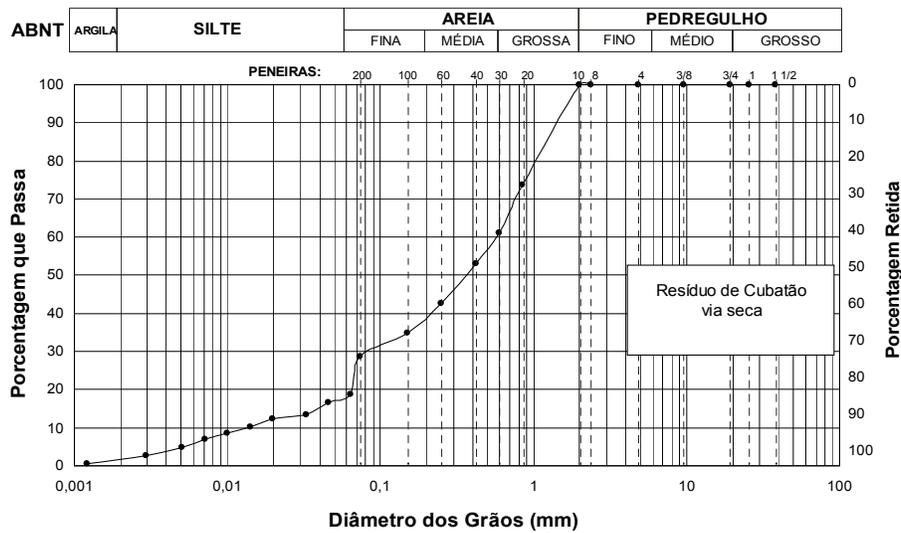
##### Granulometria

A determinação da granulometria do LETA de Cubatão foi realizada por peneiramento e sedimentação conforme a NBR 7181 (ABNT 1984). Foram determinadas, no Laboratório da COPPE / UFRJ, curvas granulométricas do resíduo em três fases apresentadas nas figuras abaixo.



**Figura 4.10** - Curva Granulométrica do LETA via úmida (w =199%)

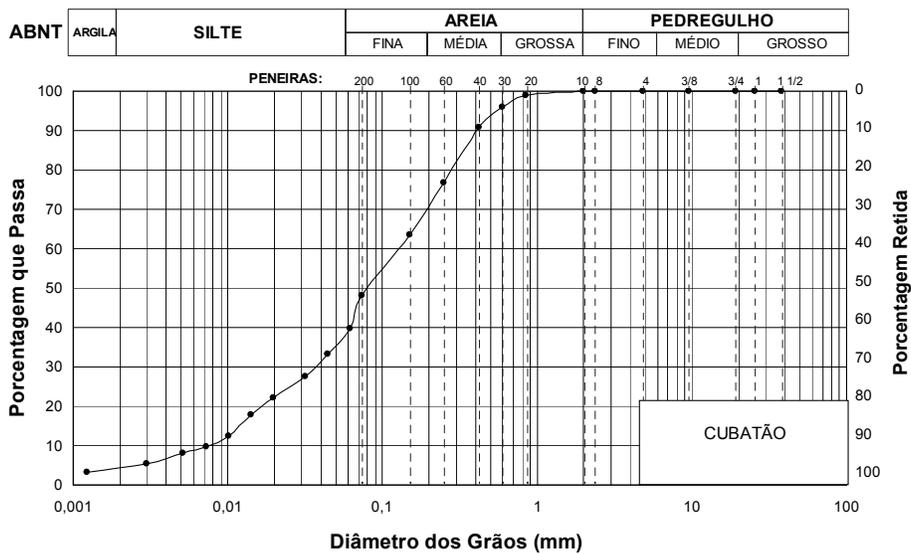
### Curva Granulométrica



Composição Granulométrica ( % ) ( Escala ABNT )					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
2	16	21	22	39	0

Figura 4.11 - Curva Granulométrica do LETA de Cubatão via seca na estufa à 110°C

### Curva Granulométrica



Composição Granulométrica ( % ) ( Escala ABNT )					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
4	35	32	25	4	0

Figura 4.12 - Curva Granulométrica do LETA via seca à temperatura ambiente

Neste trabalho foi utilizado o LETA com vários teores de umidade (W=199, 100, 70, 40 e 30%) bem como seco à temperatura ambiente, devido a sua granulometria ser mais próxima do LETA original, evitando-se assim o processo de secagem mecanizado.

**Tabela 4.1** – Comparativo da Granulometria do LETA

Composição	LETA de Cubatão			LETA de São Leopoldo Seco na estufa
	Úmido (w=199%) (Estado Natural)	Seco na Estufa (110°C)	Seco ao ar (utilizado)	
Argila (%)	72	2	4	6
Silte (%)	27	16	35	15
Areia Fina	1	21	32	21
Areia Média (%)	-	22	25	58
Areia Grossa (%)	-	39	4	-

Nota: LETA de São Leopoldo (SANTOS et al, 2001)

#### **Limites de consistência de Atterberg**

O limites de Liquidez e de Plasticidade, segundo a NBR 6459 / 84 e NBR 7180, também foram determinados no Laboratório da COPPE/ UFRJ. Os ensaios apresentaram o limite de liquidez igual a 205,3%, limite de plasticidade igual a 60,4% e índice de plasticidade igual a 144,9%.

**Tabela 4.2** – Comparativo dos Limites de consistência de Atterberg

Índices	LETA–Presente estudo	LETA – São Leopoldo
Limite de Liquidez (LL)	205%	44%
Limite de Plasticidade (LP)	60%	28%
Índice de Plasticidade (IP)	145%	16%

Nota: LETA de São Leopoldo (SANTOS et al, 2001)

Os ensaios do LETA de Cubatão foram realizados com o resíduo na umidade natural e os ensaios do LETA de São Leopoldo foram realizados na condição seca a 110°C .

### **Massa específica real**

A massa específica real foi determinada com a utilização do picnômetro convencional (DNER 093/94). O resultado obtido foi de 2,96 g/cm<sup>3</sup>.

### **Massa específica unitária**

A massa específica unitária foi determinada conforme a NBR 7251 (ABNT 1982). O resultado obtido foi de 0,79g/cm<sup>3</sup>.

#### **4.1.1.4. Características químicas**

##### **Análise química**

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório da COPPE/ UFRJ. O ataque sulfúrico visa a obtenção das porcentagens de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presentes na fração coloidal do resíduo.

Métodos de Análises:

**pH** : medição do potencial eletronicamente por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo:líquido (água e KCl 1N) na proporção de 1 para 2,5. (Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA).

**Eh** : potencial redox medido através de um potenciômetro com eletrodo redox de platina, no líquido onde foi medido o pH.

**CEE** : a condutância específica elétrica (CEE) foi determinada diretamente em Condutivímetro, no líquido onde foi medido o Eh.

##### **Ataque Sulfúrico :**

1) Perda ao Fogo ( $\Delta P$ ): obtida pela diferença de peso do solo ao ser calcinado à 550°C em relação ao solo seco à 105°C.

2) Ataque: a amostra calcinada foi tratada com ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1:1) e no extrato obtido foram analisado os teores de (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). O resíduo foi tratado

com Hidróxido de Sódio (NaOH 0,5N) e no extrato assim obtido foi analisada a percentagem de sílica (SiO<sub>2</sub>).

3) Resíduo: o resíduo final foi calcinado à 1000°C, calculando-se então a percentagem de material primário não atacado pelo tratamento (% Res.)

4) Determinação de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%) : por complexometria pelo EDTA, utilizando o ácido salicílico como indicador.

5) Determinação de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%): por complexometria pelo EDTA, após separação do ferro e titulando com ZnSO<sub>4</sub> utilizando o xilenol orange como indicador.

6) Determinação de SiO<sub>2</sub> (%): por colorimetria com molibdato de amônio, desenvolvendo o composto amarelo que absorve no comprimento de onda de 410 nm no Espectrofotômetro.

7) Orgânica (%): determinada por oxidação com Dicromato de Potássio em meio sulfúrico a quente, usando o Sulfato de Prata como catalizador, sendo o excesso de dicromato após a oxidação, dosado por titulação com solução padrão de Sulfato Ferroso Amoniacal, utilizando difenilamina como indicador. (Manual de Métodos de Análise de Solo - EMBRAPA)

Os resultados desta análise química estão apresentados na tabela 4.3.

**Tabela 4.3**—Análise química do LETA

pH(H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	Eh (mV)	CEE (μS/cm)	% M.O.	% ΔP (105°C)	% ΔP (400°C)	% ΔP (1000°C)
6,45	6,03	117,2	651	8,4	5,62	20,2	25,6

ATAQUE SULFÚRICO ( amostra seca a 105°C )				
% ΔP	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Residuo
21,46	9,31	7,71	53,97	5,58

#### **4.1.1.5. Características mineralógicas**

##### **Difratometria de raios-X (DRX)**

Segundo SABBAG e MORITA (2002) foram realizadas análises por difratometria de raios-X através do método do pó para a identificação das fases cristalinas. Os resultados mostraram que o lodo da ETA de Cubatão é composto, basicamente, de mica, goethita, quartzo, calcita e caolinita.

#### **4.1.1.6. Periculosidade Ambiental**

##### **Característica do Potencial de Risco Ambiental**

Para avaliação do potencial do risco ambiental foram realizados, no Laboratório de Geotécnica da COPPE/UFRJ, os ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004), respectivamente.

A NBR 10004 (ABNT, 2004), Resíduos Sólidos – Classificação, classifica os resíduos em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, que podem apresentar risco à saúde pública e/ou ao meio ambiente, nas seguintes classes:

- a) resíduos Classe I – perigosos;
- b) resíduos Classe II – não inertes e
- c) resíduos Classe III – Inertes.

Os ensaios de lixiviação e solubilização do LETA para o presente estudo foram realizados no corpo de prova seco e destorroado cuja formulação é: [85% de LETA / 10% de Silicato / 1% de Glutaraldeído / 4% de Cimento] e os ensaios para o LETA de Cubatão e de São Leopoldo foram realizados com o material no estado natural. Os resultados são apresentados nas tabelas 4.4 e 4.5.

**Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de lixiviação segundo a NBR 10005**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>LETA/Cubatão</b> (Presente estudo)	<b>LETA/Cubatão</b> (SABBAG e MORITA, 2002)	<b>LETA/S. Leop.</b> (SANTOS et al, 2001)
Arsênio	mgAs/L	-	<0,017	-
Bário	mgBa/L	<0,05	<0,10	0,3
Cádmio	mgCd/L	<0,01	<0,005	-
Chumbo	mgPb/L	<0,05	<0,10	-
Cobre	mgCu/L	<0,01	<0,01	-
Cromo Total	mgCr/L	<0,02	<0,05	0,04
Fluoreto	mgF-/L	-	1,5	-
Merúrio	mgHg/L	-	<0,0005	-
Níquel	mgNi/L	0,025	<0,01	-
Prata	mgAg/L	-	<0,005	-
Selênio	mgSe/L	-	<0,02	-
Zinco	mgZn/L	3,66	0,10	-
Vanádio	mgV/L	-	<1,70	-

O elevado valor do  $Zn^{+2}$  no lixiviado deve-se à sua solubilização em meio alcalino, por ser um elemento de comportamento anfótero. Não obstante, o teor desse elemento na massa bruta é igual a 15mgZn/kg (Tabela 4.6).

**Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de solubilização segundo a norma NBR 10006**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>LETA/Cubatão (Presente estudo)</b>	<b>LETA/Cubatão (SABBAG e MORITA, 2002)</b>	<b>LETA/S. Leop. (SANTOS et al, 2001)</b>
Alumínio	mgAl/L	<0,05	<0,20	-
Arsênio	mgAs/L	-	<0,017	-
Bário	mgBa/L	<0,05	<0,05	0,3
Cádmio	mgCd/L	<0,01	0,002	-
Chumbo	mgPb/L	<0,05	0,06	-
Cianeto	mgCN/L	-	0,007	-
Cloretos	mgCl-/L	ND	27	-
Cobre	mgCu/L	1,31	0,005	-
Cromo Total	mgCr/L	0,13	0,02	0,04
Dureza Total	mgCaCO <sub>3</sub> /L	-	119	-
Fenol	mgC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> OH/L	-	0,001	-
Ferro	mgFe/L	15,3	0,03	-
Fluoreto	mgF-/L	-	3	-
Manganês	mgMn/L	0,32	0,07	-
Mercúrio	mgHg/L	-	0,0005	-
Níquel	mgNi/L	0,56	0,005	-
pH		9,36	7,6	-
Prata	mgAg/L	-	0,002	-
Selênio	mgSe/L	-	0,01	-
Sódio	mgNa/L	3.324	5	-
Surfactantes	mgMBAS/L	-	<0,04	-
Zinco	mgZn/L	-	0,02	-
Vanádio	mgV/L	-	0,85	-

Nota:(-) elementos não analisados

ND=não detectado; ou seja se presente, o elemento químico está abaixo do limite de detecção da técnica de análise química (absorção atômica).

**Tabela 4.6 – Composição do LETA (massa bruta) segundo NBR10.004**

(SABBAG e MORITA, 2002)

Parâmetro	Unidade	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Arsênio	mgAs/kg	<3,0	<3,3	<3,3
Bário	mgBa/kg	<20,1	<19,8	76,3
Cádmio	mgCd/kg	1	1,1	1,1
Chumbo	mgPb/kg	<20,1	<20,1	<19,8
Cianeto	mgCN/kg	<0,2	<0,2	<0,2
Cobre	mgCu/kg	2,0	12,8	16
Cromo Total	mgCr/kg	9,8	<0,6	<28,5
Cromo Hexavalente	mgCr/kg	<0,5	<30,8	1,1
Fenol	mgC <sub>6</sub> H <sub>6</sub> OH/kg	1,9	<3,1	<3,0
Mercúrio	mgHg/kg	<0,4	<0,3	<0,25
Níquel	mgNi/kg	3,9	<1,9	<2
Óleos e Graxas	%	0,9	0,03	0,07
pH	-	7,2	7,6	7,9
Selênio	mgSe/kg	<8,1	<7,6	<7,8
Zinco	mgZn/kg	11,8	8,6	24,5
Berílio	mgBe/kg	<2	<2,0	<2,0
Vanádio	mgV/kg	<335	<329	<328
Líquidos livres	mL/100 g	0	0	0
Umidade	%	26,5	78,2	80,1

A partir dos resultados apresentados nos ensaios de solubilização e lixiviação e comparando-os com os limites máximos estabelecidos do anexo H – listagem nº 8 e anexo G – listagem nº 7 Norma NBR 10004 (1987) respectivamente, pode-se perceber que nenhum dos seus constituintes apresentaram concentração superior aos constantes desta listagem, o que leva a concluir, com relação aos resultados obtidos, que o resíduo se classifica como Classe II – Não Inerte.

#### 4.1.2. Cimento

O cimento utilizado no estudo foi o ARI da Holcim. Na tabela 4.7 estão listadas suas propriedades físicas e químicas.

**Tabela 4.7** – Caracterização do cimento fornecido pelo fabricante.

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,1
Massa unitária (m <sup>3</sup> /g)		0,85
SE Blaine (m <sup>2</sup> /g)		550
pH <sub>max</sub> (1Ci:5 H2O)		12,63
CEE [mS/cm]		7,50-8,50
[Ca(OH) <sub>2</sub> ]sol [g/l]		1,30
Composição química ponderal percentual (%)	SiO <sub>2</sub>	53,9
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32
	SO <sub>4</sub>	6,03

Nota:

SE – Superfície Específica

CEE – Condutância Elétrica Específica (Condutividade Elétrica)

#### 4.1.3. Silicato de Sódio Alcalino: Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> → [Na<sub>2</sub>O.nSiO<sub>2</sub>.mH<sub>2</sub>O]

O silicato de sódio é usado na estabilização de solos principalmente porque ele reage com os sais solúveis de cálcio em soluções aquosas para formar silicato de cálcio gelatinoso insolúvel. Os silicatos de cálcio hidratados são agentes cimentícios e melhoram a estabilidade do solo, preenchendo os seus vazios e cimentando as partículas, o que confere resistência mecânica ao material (FERREIRA e FREIRE, 2004).

A cal e o cimento são aditivos químicos bastante empregados com vista para estabilização química de solos. Por sua vez, o tratamento do solo com alcalis fortes tais como silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) favorece as reações da caolinita com a cal e o

cimento Portland, podendo a resistência inicial ser elevada em 15% a 400% (FERREIRA e FREIRE, 2003).

A composição química do silicato de sódio, fórmula molecular  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$  ( $2 < n < 4$ ), é usualmente expressa pela relação ponderal ou molecular entre os óxidos de silício e sódio. Assim um silicato de sódio de relação 3,3 partes por peso de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) para 1,0 parte por peso de óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). As soluções comerciais de silicato de sódio podem variar de 1,6 a 3,98 partes por peso de  $\text{SiO}_2$  para  $\text{Na}_2\text{O}$ .

O Silicato de Sódio Alcalino apresenta aspecto líquido viscoso incolor a turvo acinzentado ou marrom avermelhado. A caracterização do silicato de sódio é apresentada na tabela 4.8.

**Tabela 4.8 – Caracterização do Silicato de Sódio.**

$\text{Na}_2\text{O}$	14,50 a 15,50 %
$\text{SiO}_2$	31,50 a 33,00 %
$\text{H}_2\text{O}$	53,00 %
Relação (p/p)	2,10 a 2,20
Densidade	52,0 a 53,0 Bé
Peso específico	1,560 a 1,585 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidade a 20 °C	900 a 1.400 cp
Sólidos Totais	46,0 a 49,0%

Aplicações:

- ✓ Indústrias cerâmicas como agente redutor de viscosidade, sua aplicação é geradora de grande economia e qualidade no produto final;
- ✓ Indústria de fundição como agente de ligação para a areia, importante na produção de moldes;
- ✓ Indústria de sabão como agente emulsificante, redutor de tensão superficial, regulador de viscosidade entre outras vantagens;

- ✓ Indústria têxtil para manter o valor do pH em uma faixa apropriada evitando assim os efeitos desagradáveis dos traços de metais contaminantes presentes;
- ✓ Soluções de silicato de sódio alcalino são também empregadas com sucesso no tratamento de água, tintas especiais, eletrodos e fluxos, precipitados de sílica e géis e
- ✓ Fabricação de metassilicato de sódio.

#### **4.1.4. Glutaraldeído: 1,5-Pentanodial → [(COH)2.C3H6]**

Sua função no sistema estabilizador usado é o de reagir com os íons silicato através de um mecanismo não bem compreendido, favorecendo a mais ou menos rápida polimerização dos íons silicato.

#### **4.1.5. Areia**

A areia utilizada no presente estudo foi obtida do processo de fabricação do vidro temperado da marca Blindex. É um material com alto teor de sílica (SiO<sub>2</sub>). Suas características são apresentadas a seguir.

A massa específica unitária da areia estudada é 1,230 g/cm<sup>3</sup> e a massa específica real 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

A areia, para ser utilizada na fabricação do vidro, passa por um processo de purificação para retirada do ferro residual, evitando interferência na coloração do produto. Portanto, a areia utilizada apresenta uma quantidade de óxido de ferro (0,479%) superior à recomendada para produção de vidros (0,1%), por isso não é utilizada pela indústria deste material. O grau de pureza da areia é de 99,05% de SiO<sub>2</sub>, segundo análise realizada no Laboratório de Geotecnia da COPPE e apresentada na tabela 4.9.

**Tabela 4.9 – Composição Química da areia**

<b>Composto</b>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CoO
<b>Quant.(%)</b>	97,05	1,24	0,48	0,02	0,09	0,07	0,17	0,07	0,001	0,045

#### **4.1.6. Cal Hidratada - Ca(OH)<sub>2</sub>**

Foi utilizada a cal hidratada CH-III , de acordo com as exigências químicas da NBR 7175 dez/2002, por ser esta a mais facilmente encontrada no mercado, além de ser mais barata, o que a torna mais utilizada pelos fabricantes de componentes de solo estabilizado. A marca da cal utilizada foi Vetec/Brasil.

A Cal é um pó fino, de cor branca, inodora. Sua massa específica pode variar de acordo com a concentração de cálcio e magnésio podendo ser: 2,3 a 2,4 g/cm<sup>3</sup> quando tem alto teor de cálcio, 2,4 a 2,6 g/cm<sup>3</sup> quando é dolomítica super hidratada e 2,7 a 2,9 g/cm<sup>3</sup> quando é dolomítica normalmente hidratada. Sua densidade aparente situa-se entre 0,3 a 0,65 g/cm<sup>3</sup> e densidade aparente com valor aproximado de 0,90 a 1,1 g/cm<sup>3</sup> .

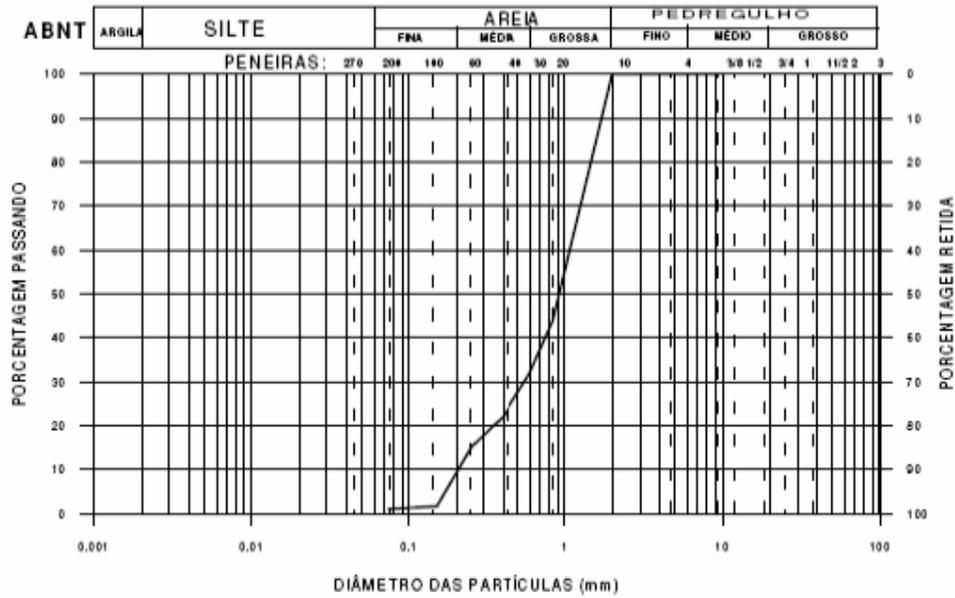
#### **4.1.7. Pó de Pedra**

As características físicas do pó de pedra estão descritas na tabela 4.10, bem como as respectivas normas técnicas utilizadas. A curva granulométrica do pó de pedra segundo a NBR 7181 (1986), encontra-se na figura 4.13.

**Tabela 4.10 – Características físicas do pó de pedra e respectivas normas técnicas**

Umidade natural NBR 6457 (1986)	1%
Módulo de Finura NBR 7181 (1986)	6,03

### Curva Granulométrica



**Figura 4.13** – Curva Granulométrica do pó de pedra

## **4.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Nesta pesquisa estudou-se o efeito da adição de alguns aditivos químicos, notadamente conhecidos como estabilizantes de solos (cal, cimento, silicato de sódio, glioxal e glutaraldeído) a um solo argiloso, no nosso caso LETA de Cubatão, e com a mistura moldar corpos de prova que tiveram suas características físico-químicas e mecânicas determinadas no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

O aproveitamento do resíduo em tela tem como objetivo preparar formulações capazes de atenuar os consumos de cimento, cal, argila e areia, aproveitando o máximo do resíduo estudado, adequando-o à fabricação de elementos construtivos estruturais.

### **4.2.1. Ensaio de Retração Linear** (Molde prismático 30 x 2 x 2 cm)

Este ensaio, muito simples e fácil de fazer, guarda um estreito interrelacionamento com a porcentagem de finos ativos de um material. Utilizado para monitorar e especificar as formulações para serem submetidas ao protocolo mecânico. O ensaio consiste em preparar a mistura com consistência pastosa, preencher o molde e deixar secar à temperatura ambiente.

Areia, pó de pedra; cal, cimento, poliacrilamida e sulfato de cálcio foram os materiais utilizados para a modificação da consistência e adequação do LETA.

### **4.2.2. Ensaio Físico Químico – Procedimento Experimental**

O indiano CHADA (1970) desenvolveu o ensaio para a dosagem do solo-cimento. Este ensaio foi aperfeiçoado por CASANOVA E CERATI em 1986 e modificado por CASANOVA em 1994 que verificou a possibilidade de sua utilização para a determinação da atividade pozolânica do material.

O objetivo da utilização do Método Físico-Químico (MFQ) é avaliar o grau de reatividade pozolânica de um material e a quantidade necessária de ligante hidráulico para que o sistema desenvolva características mecânicas adequadas. O método dispensa pessoal treinado pois faz uso de equipamentos simples como uma balança e provetas graduadas e é atualmente empregado no Laboratório de Geotécnica da COPPE/UFRJ.

O MFQ é um ensaio simples para indicar a quantidade de aditivo (cimento, cal ou outro) estritamente necessária para permitir que o material fique em equilíbrio em uma nova situação.

O método é utilizado para rápida verificação da viabilidade de um determinado material poder ou não ser estabilizado economicamente com cimento/cal. O mesmo vale para qualquer outro material de natureza pozolânica. Obviamente a execução do ensaio mecânico é imprescindível. No exemplo em questão, caso a porcentagem determinada não seja capaz de garantir a resistência mecânica mínima requerida, um valor diferente ao indicado pelo ensaio deve ser adotado e testado.

#### **4.2.2.1. Etapas do Método Físico-Químico:**

- ✓ Amostras de LETA são colocadas em provetas graduadas (precisão de leitura de 2 ml) de 250 ml.
- ✓ Acrescenta-se cimento, (cimento + cal) ou cal, às substâncias anteriores aditivadas, ou não, com porcentagens variáveis de  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{CaCl}_2$ , etc.
- ✓ Aproximadamente 50ml de água destilada são adicionados em cada proveta, as quais são vigorosamente agitadas em seguida com o objetivo de se obter uma homogeneização total da mistura.

- ✓ O volume é então completado para 150ml, tendo-se o cuidado de lavar as paredes das provetas.
- ✓ Após um repouso por um período de 24 horas em bancada isolada de vibrações, procede-se à primeira leitura do volume aparente ocupado pelo sedimento em suspensão.
- ✓ Após cada leitura, utilizando-se uma haste de baquelite agita-se manualmente a suspensão em cada proveta, tomando o cuidado de fazê-lo durante o mesmo intervalo de tempo e com a mesma intensidade.
- ✓ Diariamente as leituras são repetidas assim como a operação descrita anteriormente, até obtenção de leituras constantes ou decrescentes. O teor mínimo de cimento ou de cal indicado para estabelecer o equilíbrio entre a pozolana e o aditivo, corresponde àquele que apresentar ao longo do período de duração do ensaio, a maior variação volumétrica da suspensão com relação ao volume inicial de cada proveta. O tempo de duração do ensaio varia com o sistema. Para o solo-cimento é de 3 a 5 dias; para o solo cal chega até 10 dias e para sistemas pozolânicos ele é bastante dependente da reatividade daquelas, podendo variar de alguns dias a semanas.

#### **4.2.2.2. Ensaio físico-químico realizados**

Foram realizados ensaios físico-químicos para os seguintes sistemas, visando determinar a atividade pozolânica assim como o teor mínimo de cal ou cimento, requerido por cada um.

- ✓ LETA + 5% de cal
- ✓ LETA + 5% de cal + 6% de cimento
- ✓ LETA + 5% de cal + 8% de cimento
- ✓ LETA + 5% de cal + 10% de cimento

#### **4.2.3. Ensaio de Resistência à Compressão Simples- Procedimento Experimental**

De forma a ampliar as alternativas de aproveitamento do LETA, optou-se pela sua utilização na forma natural, ou seja  $w = 199\%$ , tentando-se eliminar a etapa de secagem e seus custos relativos. Devido a resultados não satisfatórios o LETA passou por processo de secagem até perder todo teor de água.

O primeiro passo foi procurar compostos que absorvessem a água do LETA para permitir sua moldagem e os ensaios de Resistência à Compressão Simples. Preparou-se amostras em recipientes plásticos, às quais foram adicionadas produtos químicos com esse objetivo. Os resultados não foram satisfatórios.

Optou-se então por obter experimentalmente um aglomerante aplicando os princípios diagenéticos. Aglomerantes estes que são produzidos cotidianamente pela natureza num processo que pode ser considerado como aberto e dinâmico e que acontece dentro de períodos de tempo ditos geológicos, incompatíveis com aplicação prática na construção civil (SBRIGHI NETO e HELENE, 1993).

Para que o aglomerante consolide os agregados sem circulação de fluidos e em período menor de tempo é preciso transformar o processo aberto e dinâmico que acontece na natureza num processo estático e fechado no qual ocorram os fenômenos diagenéticos. Para tal utilizou-se o glutaraldeído como agente precipitante e polimerizante do silicato. O silicato assim insolubilizado e polimerizado age como aglomerante da massa pela ocupação dos vazios intergranulares e ancoragem das partículas umas nas outras, dando origem a uma massa coerente e resistente.

Para a seleção e escolha da mistura (silicato+glutaraldeído) mais adequada, efetuou-se diversos experimentos variando as concentrações dos dois compostos, bem como a sua razão em volume.

Os resultados mostraram que a presença de água, independentemente da razão (silicato/aldeído) acarreta num excessivo tempo de polimerização do silicato, além de dificultar o preparo dos corpos de prova, visto a elevada umidade já presente no LETA. Em razão disso, e porque tanto o silicato quanto o aldeído já contém originalmente água, 52% e 60%, respectivamente, optou-se por não adicionar água à mistura dessas substâncias. Por outro lado, determinou-se através do tempo de gelificação e da trabalhabilidade, que a razão (silicato/glutaraldeído) variou entre (1/3,5) e (1/10).

A preparação dos corpos de prova por compactação estática, visando a avaliação das várias formulações testadas, torna-se simples fixando-se a priori valores para a massa específica aparente seca. A partir desta calcula-se então a massa da mistura úmida necessária para o preparo dos corpos de prova de volume V (fixo).

$$\text{Assim: } M_u = V \cdot (1+w) \cdot \rho_d$$

Onde:

$M_u$  = Mistura Úmida

$V$  = Volume Interno do Cilindro Metálico (molde)

$W$  = Umidade da Mistura dividida por 100

$\rho_d$  = Massa Específica Aparente Seca

Sabe-se que a resistência de um artefato cimentado é afetada pela sua porosidade, a qual é determinada pela razão (água/materiais cimentícios). Desse modo, para a comparação de resistências o usualmente admitido é manter essa razão fixa ao invés de variá-la, com base na constância da consistência da argamassa, pasta ou concreto. Desse modo, muitos autores preferem e recomendam manter constante a relação (água/sólidos) nos ensaios de pozolanicidade.

Além da resistência de uma massa cimentícia depender da sua porosidade inicial, também é dependente do grau de avanço do processo pozolânico (e do de hidratação

do cimento); ou seja, do espaço que é preenchido pelos compostos neo-formados assim como da resistência desses produtos.

Na realidade, a correta avaliação da pozolanicidade de um material requer a separação do efeito da razão (água/sólidos) ou (água/cimento) daquele intrinsecamente ligado à sua pozolanicidade. Usualmente, isso é obtido fixando-se o teor de água como recomenda a norma ASTM C109 para o ensaio de Resistência à Compressão Simples de argamassas a base de cimentos hidráulicos.

Não obstante, devido à forte influência da massa específica aparente seca no valor da resistência à compressão simples, resolveu-se fixar seu valor e variar o fator (água/sólidos).

O teor de água foi delimitado pela possibilidade de compactar as misturas. Em vista disso, a consistência das misturas variou entre seca a úmida friável. Amostras com umidade acima do máximo requerido, apresentaram maior ou menor exudação de água quando compactadas, enquanto com a umidade abaixo do mínimo requerido a conformação do corpo de prova era impossível.

A moldagem dos corpos de prova foi feita imediatamente após a homogeneização da mistura, objetivando que as reações físico-químicas de flocculação (no caso de amostras contendo LETA) e as químicas de cimentação (casos do cimento, silicato e glutaraldeído) não dificultassem a compactação. É fato conhecido que a demora na compactação de misturas cimentíceas, com todos os outros fatores iguais, leva inexoravelmente a menores valores de massa específica aparente e conseqüentemente de resistência.

No caso do solo-cimento, por exemplo, um atraso de meia hora pode chegar a acarretar uma diminuição de 30% ou mais, no valor da RCS (FAJARDO, 2005).

A moldagem dos corpos de prova, com 2cm de diâmetro e 4cm de altura, foi efetuada através da compactação estática, em cilindro metálico, conforme mostra a figura 4.14 (GUILHERMINO, 2008).



**Figura 4.14-** Cilindro utilizado para a moldagem dos corpos de prova (2x4)cm.

Após a compactação, os corpos de provas eram extraídos dos moldes por ação de um macaco hidráulico (figura 4.15), medindo-se suas alturas e pesos. Em seguida, eram colocados sobre a bancada e curados à temperatura ambiente por 7 dias, porque foi constatado que a cura nestas condições dá melhores resultados com relação àquela em câmara úmida. Tal fato, a princípio discordante do conhecimento e da prática já bem estabelecidos, tem explicação na ação do silicato sobre o cimento. A hidratação é sobretudo acelerada por aquele, acarretando a sua rápida pega. O ganho de resistência do cimento dá-se então mais rapidamente. Além disso, a polimerização do silicato é estimulada pela evaporação da água.



**Figura 4.15** - Macaco hidráulico utilizado para extração do corpo de prova

O equipamento usado para compactação foi uma prensa eletromecânica marca Wykeham Farrance (Figura 4.16). Após os 7 (sete ) dias os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, com velocidade constante igual a 0,3 mm/min. As medidas de carga foram obtidas por um anel dinâmométrico fixado à prensa com capacidade máxima de 1 tonelada (Figura 4.17).

Para cada formulação foram confeccionados 2 corpos de prova. Após o rompimento os melhores resultados foram selecionados e usados como referência para outras formulações.



**Figura 4.16 – Prensa Eletromecânica**



**Figura 4.17 – Ensaio de Resistência a Compressão Simples**

## CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RETRAÇÃO LINEAR

Areia, pó de pedra; cal, cimento, poliacrilamida e sulfato de cálcio, foram os materiais utilizados para a modificação da consistência e adequação do LETA (Tabela 5.1).

**Tabela 5.1** – Formulações analisadas – Retração Linear

Amostra	LETA	Areia	Pó -Pedra	Cal	Ci	PAA	Sulfato
1	100						
2	100	50	50				
3	100		100				
4	100		150				
5	100		100	5			
6	100		150	5			
7	100		100	5	7		
8	100					10	
9	100		100			10	
10	100		100	5		3	
11	100		100	5	7	3	
12	100	100		5			5
13	100		100	8		3	5
14	100		100	5	7	3	
15	100		100	5		3	10
16	100		100	5-CV		6	
17	100		100	5-CV	7	6	
18	100		100	5			5
19	100		100	5		6	5
20	100		100		7	6	5
21	100				4-CE		
22	100				6-CE		
23	100				8-CE		
24	100		200		7		
25	100		200	5			

PAA - Poliacrilamida

CV – Cal Viva

CE – Cimento Expansivo

A quantidade de materiais representa porcentagens que variam em relação à 100% da parte sólida do LETA.

No caso em questão, o resultado encontrado aponta para uma elevada porcentagem de argila, a qual ao secar lentamente originou a contração que levou ao padrão observado nas figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7.

Os resultados encontrados mostraram um elevadíssimo grau de retração do LETA e indicaram o uso de elevadas porcentagens de pó de pedra e/ou areia para a redução da retração. A cal, o cimento, a PAA (Poliacrilamida) e o sulfato de cálcio, também mostraram-se incapazes de reduzir a retração do LETA a um nível compatível de modo a permitir o fácil processamento.



**Figura 5.1** – Amostra nº 1 [LETA-100%]



**Figura 5.2** – Amostra nº 9 [LETA-100% / Pó de pedra-100% / PAA-10%]



**Figura 5.3** – Amostra nº 13 [LETA-100% / Pó de pedra-100% / Cal -8% /  
PAA-3% / Sulfato de cálcio -5%]



**Figura 5.4** – Amostra n° 15 [LETA-100% / Pó de pedra-100% / Cal-5% /  
PAA - 3% / Sulfato de cálcio -10%]



**Figura 5.5** – Amostra n° 24 [LETA-100% / Pó de pedra-200% / Cimento-7%]



**Figura 5.6** – Amostra nº 25 [LETA-100% / Pó de pedra-200% / Cal-5%]



**Figura 5.7** – Amostras nº 21 a 25

## **5.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS**

### **5.2.1. Sistema [LETA / Cal / Cimento]**

O sistema I, constituído de LETA com 5% de cal e 0% de cimento, apresentou sedimentação inicial muito lenta e a interface sólido/líquido mal definida. O volume máximo aparente foi de 108m<sup>3</sup> e variação volumétrica de 15%. A tabela 5.2 apresenta as variações volumétricas dos sistemas.

No sistema II, constituído de LETA com 5% de cal e 6% de cimento, a sedimentação inicial foi lenta e interface sólido/líquido bem definida, indicando a floculação do LETA. O volume máximo aparente foi de 110m<sup>3</sup> e a variação volumétrica de 17%.

Observou-se no sistema III, constituído de LETA com 5% de cal e 8% de cimento, que a sedimentação inicial foi rápida e a interface sólido/líquido bem definida. O volume máximo aparente foi de 102m<sup>3</sup> e a menor variação volumétrica dos sistemas, de 8,5%. Neste caso houve a dispersão do LETA, fato atestado pelo baixo valor da variação volumétrica.

O sistema IV, constituído de LETA com 5% de cal e 10% de cimento, apresentou sedimentação inicial lenta e a interface sólido/líquido mal definida. O volume máximo aparente foi de 114m<sup>3</sup> e a maior variação volumétrica dos sistemas, de 21%.

Todos os sistemas apresentaram idêntica cinética de expansão, com o equilíbrio sendo atingido rapidamente ao fim de um dia.

**Tabela 5.2-** Variações Volumétricas dos Sistemas [ LETA / Cal / Cimento ]

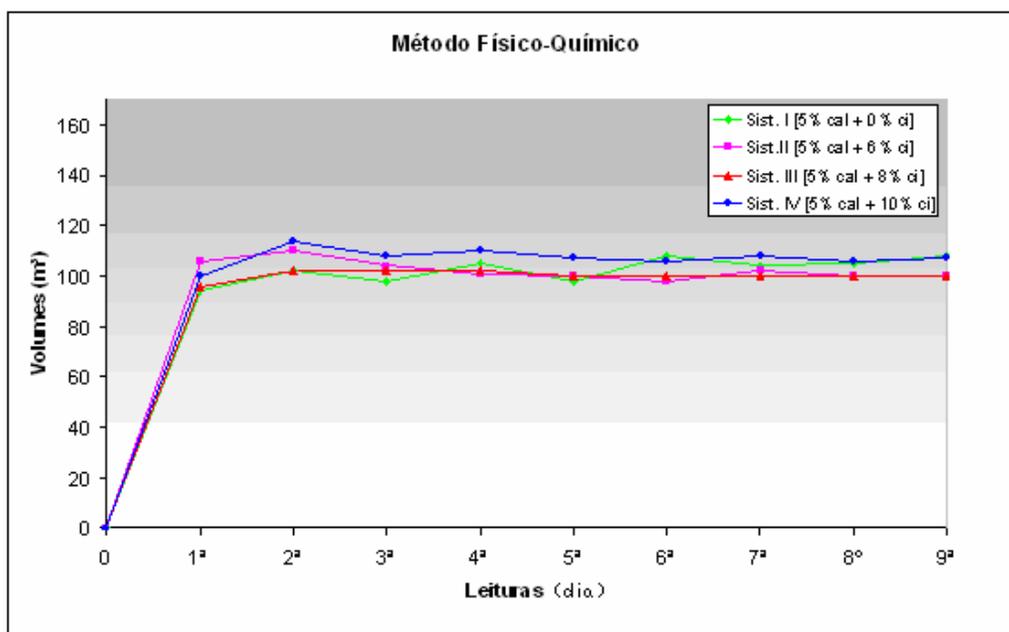
Ci (%)	Volumens (m³)									ΔV (%)
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	
<b>0</b>	94	102	98	105	98	<b>108</b>	104	105	108	<b>15</b>
<b>6</b>	106	<b>110</b>	104	101	100	98	102	100	100	<b>17</b>
<b>8</b>	96	<b>102</b>	102	102	100	100	100	100	100	<b>8,5</b>
<b>10</b>	100	<b>114</b>	108	110	107	106	108	106	107	<b>21</b>

Nota: Todos os sistemas continham 5% de cal.

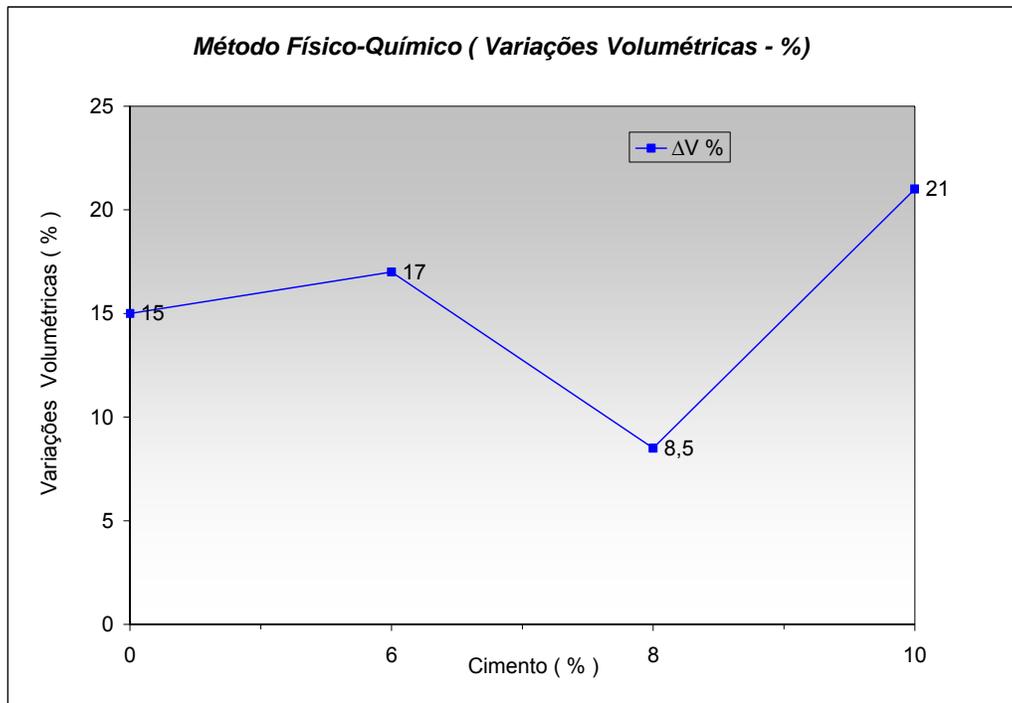
Ci – Cimento Portland.

ΔV – Variação Volumétrica.

O gráfico 5.1 apresenta as variações volumétricas de cada sistema (m³) e 5.2 apresenta as variações volumétricas (%) em relação ao volume inicial do sistema [5% de cal / 0% de cimento] para os teores de cimento testados em um dado período de tempo.



**Gráfico 5.1-** Variações Volumétricas ( m³) dos Sistemas [ LETA+Cal+Cimento]



**Gráfico 5.2.** Variações Volumétricas ( % ) dos Sistemas [LETA+Cal+Cimento]

Os resultados do MQF indicam que a porcentagem de cimento mais adequada é de 6%.

### 5.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Os corpos de prova foram compactados estaticamente e o tempo de cura foi de 7 dias, à temperatura ambiente. O teor de água foi fixado para proporcionar a maior massa específica aparente seca.

As formulações testadas estão identificadas pelos materiais que as compõem de acordo com a legenda abaixo.

Legenda:

LETA – Lodo da Estação de Tratamento de Água

CP – Corpo de Prova

A – CP com Areia

AL – CP com Areia e LETA

L – CP com LETA

Sil – Silicato de Sódio Alcalino

Glut – Glutaraldeído

Ci – Cimento Portland

F (a/s) – Fator água / sólidos

$\rho_d$  – Massa Específica Aparente Seca

RCS – Resistência à Compressão Simples

R (sil/glut) – Razão silicato/glutaraldeído

#### 5.3.1. Sistema I [Areia/Silicato/Glutaraldeído/Cimento]

Para avaliação deste sistema optou-se pela utilização da areia por ter sido utilizada nos estudos exploratórios citados anteriormente. A partir dos resultados obtidos constatou-se a viabilidade da adição do LETA em outras formulações.

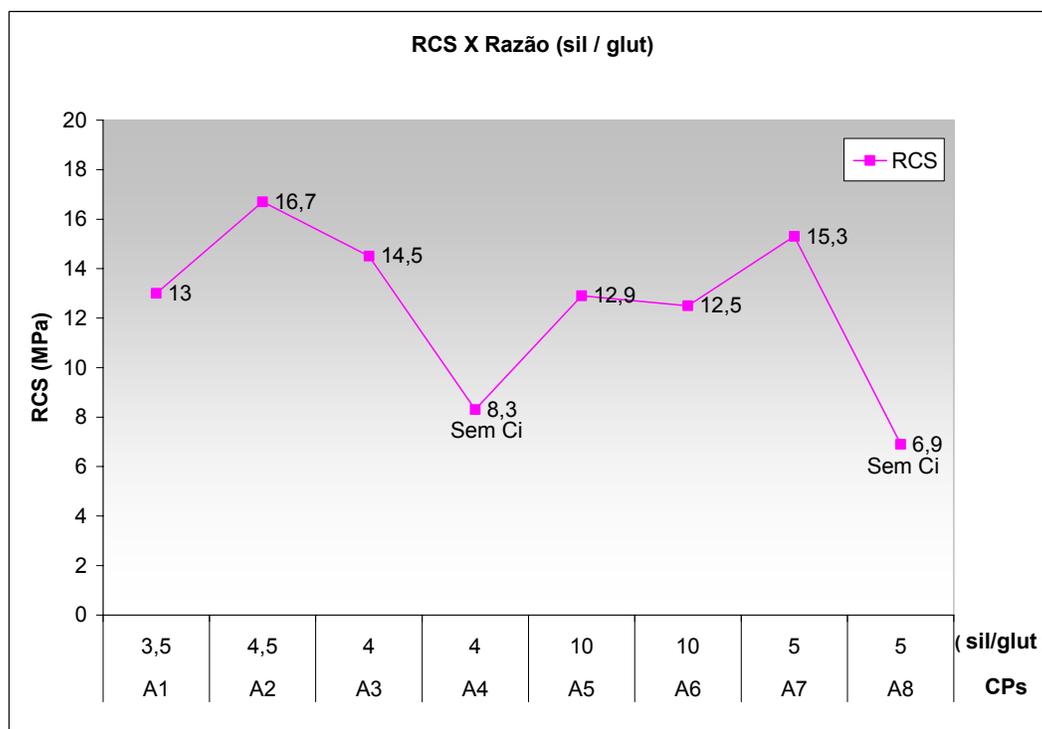
As misturas apresentaram teores de água na faixa de 12 a 19% e de Massa Específica Aparente Seca de 1,9 a 2,1g/cm<sup>3</sup>.

As formulações e resultados são apresentados na tabela 5.3. Nas formulações dos CP's A1, A2, A3 e A4 utilizou-se razões [sil / glut] obtidas nos estudos exploratórios.

Nas formulações A5 e A6 utilizou-se a razão de sil/glut (10/1). Nas formulações dos CP A7 e A8 optou-se por uma razão intermediária igual a (10/2).

**Tabela 5.3.- Resistências à Compressão Simples (RCS)**

Formulações								
CP	LETA(%)	Areia (%)	Sil (%)	Glut (%)	Ci(%)	F (a/s)	$\rho_d(g/cm^3)$	RCS(MPa)
A1	-	81,0	11,7	3,3	4,0	0,17	1,9	<b>13,0</b>
A2	-	82,0	11,9	2,6	3,4	0,16	2,1	<b>16,7</b>
A3	-	85,8	9,0	2,2	3,0	0,13	2,1	<b>14,5</b>
A4	-	88,5	9,2	2,3	-	0,13	2,0	<b>8,3</b>
A5	-	86,3	9,0	0,9	3,8	0,12	2,0	<b>12,9</b>
A6	-	90,6	5,0	0,5	3,9	0,6	1,9	<b>12,5</b>
A7	-	85,3	10,0	2,0	4,0	0,12	2,0	<b>15,3</b>
A8	-	89,1	10,0	2,0	-	0,12	2,0	<b>6,9</b>



**Gráfico 5.3 – Resistência à Compressão Simples X Razão [sil / glut]**

Pode-se observar que as Resistências à Compressão Simples (RCS) são maiores para valores da razão (sil / glut) entre 4 e 5, e que a medida que tal valor aumenta, diminui a resistência.

Observa-se também que a introdução do cimento dobrou a RCS para os corpos de prova A3 e A7, ambos com razão (sil / glut) entre 4 e 5. Não obstante, a adição do cimento não se faz necessária para o sistema [Areia + Silicato + Glutaraldeído] em vista dos resultados de RCS obtidos (8,3 e 6,9) MPa.

### 5.3.2. Sistema II [LETA (w=199%)/Areia/Silicato/Glutaraldeído/Cimento]

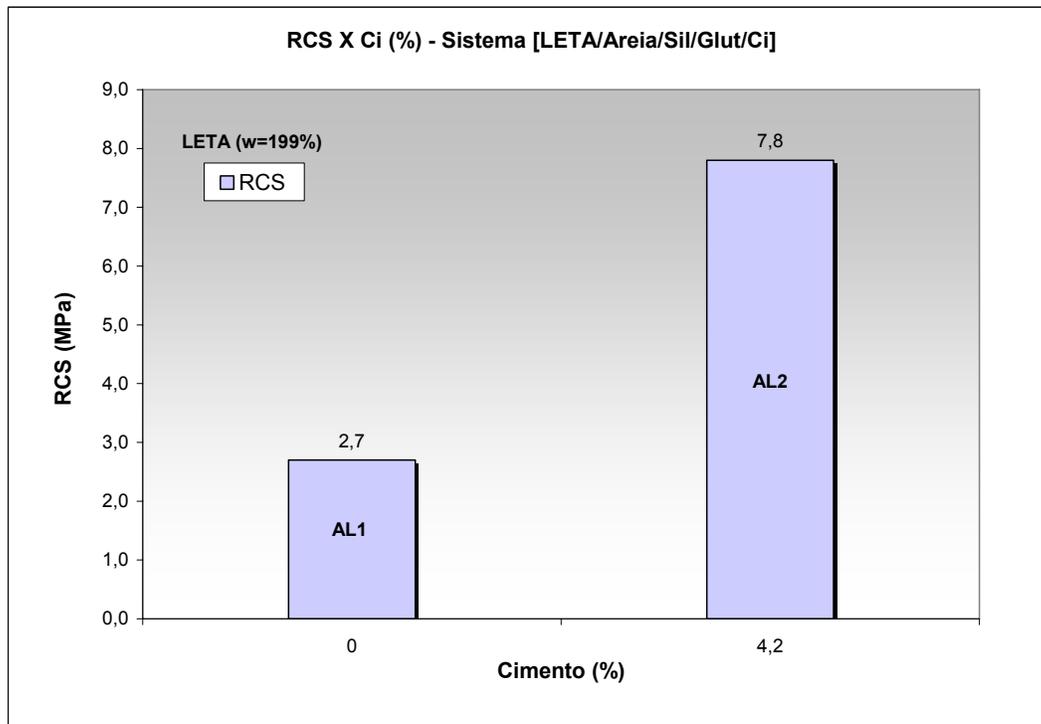
Para o estudo deste sistema optou-se pela adição do LETA com 199% de umidade para avaliar a possibilidade de utilização do resíduo mantendo-se suas características naturais.

Os resultados apresentados na tabela 5.4 indicam que a introdução de pequena quantidade de LETA (4,2%) diminuiu as RCS dos sistemas (com e sem cimento) mesmo para a razão (sil / glut) próxima do valor ótimo.

O menor valor para a massa específica aparente seca (ou maior para o f(a/s) deve-se à água presente no LETA, o que sem dúvida também deve ter contribuído para a queda de resistência.

**Tabela 5.4.- Resistências à Compressão Simples (RCS)**

Formulações								
CP	LETA(%)	Areia (%)	Sil (%)	Glut (%)	Ci(%)	F (a/s)	$\rho_d(g/cm^3)$	RCS(MPa)
AL1	4,2	87,4	7,1	1,3	-	0,17	1,8	2,7
AL2	4,2	83,2	7,1	1,3	4,2	0,17	1,8	7,8



**Gráfico 5.4 – Resistência à Compressão Simples x Cimento (%)**

Comparando-se os CP's cujas formulações diferem apenas no teor de cimento, observa-se que a RCS do CP AL1 sem cimento é 66% menor do que a RCS do CP AL2. Embora a RCS seja aceitável para elementos de vedação, a utilização de pequena quantidade do LETA torna o sistema do ponto de vista do aproveitamento do resíduo, pouco atrativo.

### **5.3.3. Sistema III [Areia/Silicato/Glutaraldeído/Cimento]**

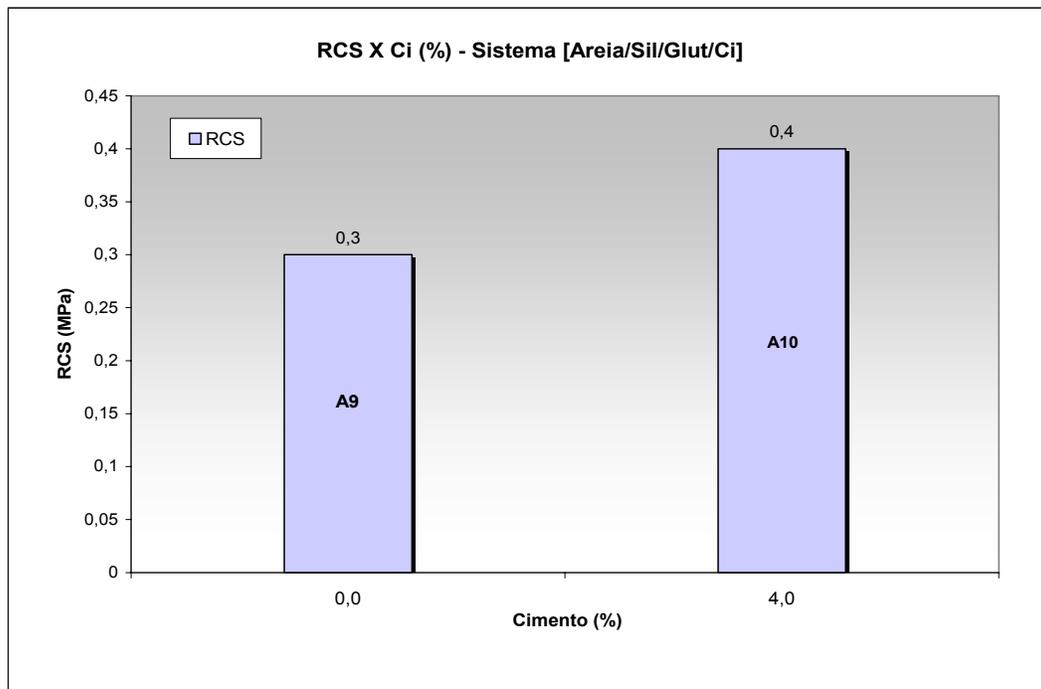
Para avaliação deste sistema optou-se pela utilização da areia como material base para outras formulações.

Neste caso, houve necessidade de se acrescentar 2ml de água à mistura de modo a facilitar a compactação. As misturas apresentaram o teor de água de 10% e a Massa Específica Aparente Seca foi igual a 1,8g/cm<sup>3</sup>.

As formulações e resultados são apresentados na tabela 5.5 e diferem basicamente pelo teor de cimento.

**Tabela 5.5.- Resistências à Compressão Simples (RCS)**

Formulações								
CP	LETA(%)	Areia (%)	Sil (%)	Glut (%)	Ci(%)	F (a/s)	$\rho_d(g/cm^3)$	RCS(MPa)
A9	-	98,8	1,0	0,2	-	0,10	1,8	<b>0,3</b>
A10	-	94,8	1,0	0,2	4,0	0,10	1,8	<b>0,4</b>



**Gráfico 5.5 – Resistência à Compressão Simples x Cimento (%)**

Neste caso, diferentemente dos apresentados na tabela 5.4, os valores obtidos para a RCS foram bastante baixos, inclusive a mistura contendo cimento.

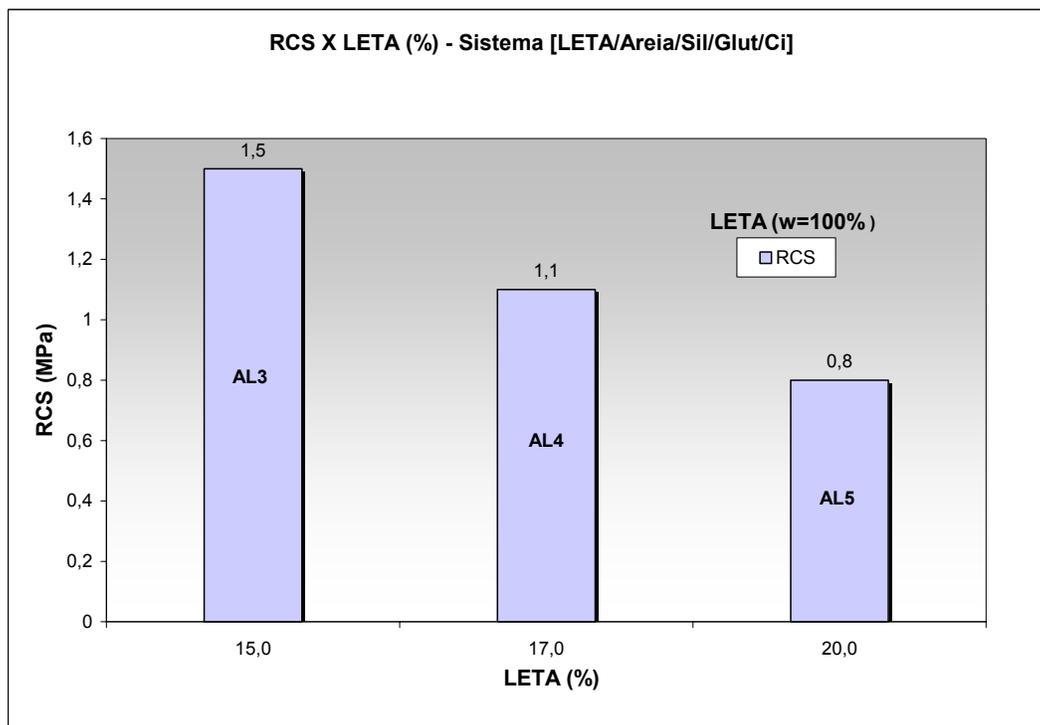
A explicação reside nas pequenas porcentagens de silicato e aldeído que não foram suficientes para conferir resistência mecânica aos corpos de prova, apesar da razão (sil/ glut) ser igual a 5, que é o valor ótimo.

### 5.3.4. Sistema IV [LETA (w=100%)/Areia/Silicato/Glutaraldeido/Cimento]

Para o estudo deste sistema optou-se pela adição do LETA até umidade igual a 100%. As misturas apresentaram teores de água de 28 e 29% e a Massa Específica Aparente Seca foi igual a 2,1g/cm<sup>3</sup>. As formulações e resultados são apresentados na tabela 5.6 e variam em relação à quantidade do LETA.

**Tabela 5.6.- Resistências à Compressão Simples (RCS)**

Formulações-LETA (100% de Umidade)								
CP	LETA(%)	Areia (%)	Sil (%)	Glut (%)	Ci(%)	F (a/s)	$\rho_d(g/cm^3)$	RCS(MPa)
AL3	15,0	73,3	7,0	0,7	4,0	0,28	2,1	1,5
AL4	17,0	71,3	7,0	0,7	4,0	0,29	2,1	1,1
AL5	20,0	68,3	7,0	0,7	4,0	0,29	2,1	0,8



**Gráfico 5.6.- Resistência à Compressão Simples X LETA (%)**

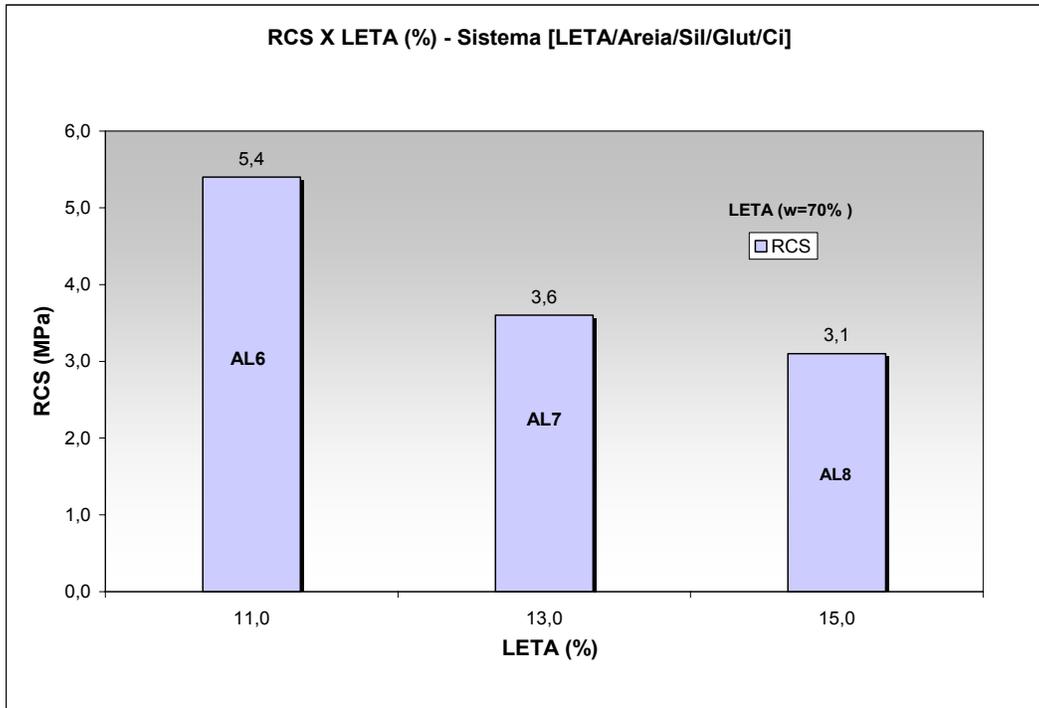
Nestas formulações, todas com razão (sil/glut) igual a 10 e porcentagem de cimento igual a 4%, os valores de RCS ficaram aquém do necessário devido à quantidade do LETA com 100% de umidade, o que originou o elevado fator (água/sólidos), certamente a causa dos baixos valores da RCS.

### 5.3.5. Sistema V [LETA (w=70%)/Areia/Silicato/Glutaraldeido/Cimento]

Para o estudo deste sistema optou-se pela adição do LETA com 70% de umidade. As misturas apresentaram o teor de água entre 20 a 23% e a Massa Específica Aparente Seca igual 2,1g/cm<sup>3</sup>. As formulações e resultados são apresentados na tabela 5.7 .

**Tabela 5.7.- Resistências à Compressão Simples (RCS)**

<b>Formulações-LETA (70% de Umidade)</b>								
<b>CP</b>	LETA(%)	Areia (%)	Sil (%)	Glut (%)	Ci(%)	F (a/s)	$\rho_d(g/cm^3)$	<b>RCS(MPa)</b>
<b>AL6</b>	11,0	77,3	7,0	0,7	4,0	0,20	2,1	<b>5,4</b>
<b>AL7</b>	13,0	75,3	7,0	0,7	4,0	0,22	2,1	<b>3,6</b>
<b>AL8</b>	15,0	73,3	7,0	0,7	4,0	0,23	2,1	<b>3,1</b>



**Gráfico 5.7.- Resistência à Compressão Simples X LETA(%)**

Neste sistema, a porcentagem do LETA foi diminuída variando entre (11 e 15%), o que levou à variação do fator (a/s) de 0,20 a 0,23, fazendo a RCS aumentar significativamente. A tabela 5.7 mostra que para a porcentagem do LETA aumentar, o seu teor de umidade deve ser inferior a 70%.

### 5.3.6. Sistema VI [LETA (w=40%)/Areia/Silicato/Glutaraldeido/Cimento]

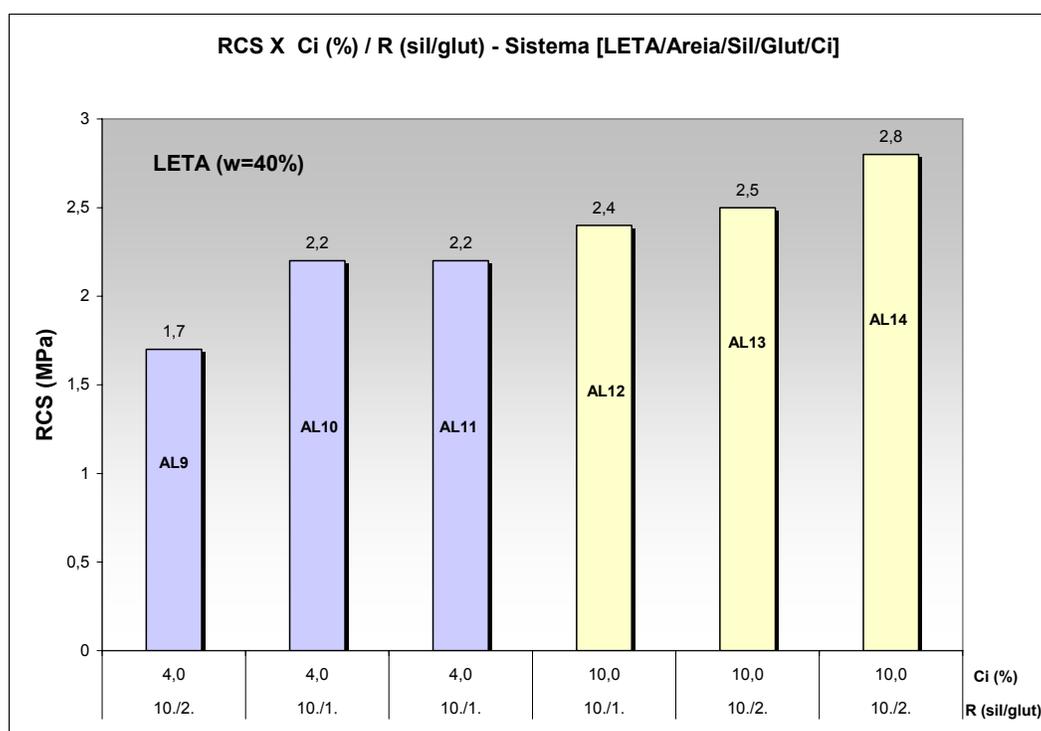
Neste sistema, a umidade do LETA foi fixada em 40%. A tabela 5.8 mostra duas formulações diferindo no teor de cimento. Para a obtenção de valores da RCS mínimos necessários (2MPa), com 4% (massa) de cimento, o teor do LETA não pode ser maior que 26%, enquanto que mesmo para 10% de cimento e 24% de LETA a RCS pouco aumentou.

A adição da cal nas formulações AL11 e AL14 não interferiram, de forma significativa, nas resistências.

**Tabela 5.8.- Resistências à Compressão Simples (RCS)**

<b>Formulações- 4% de Ci</b>								
<b>CP</b>	<b>LETA(%)</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>Sil (%)</b>	<b>Glut (%)</b>	<b>Ci(%)</b>	<b>F (a/s)</b>	<b><math>\rho_d(g/cm^3)</math></b>	<b>RCS(MPa)</b>
<b>AL9</b>	26,0	58,0	10,0	2,0	4,0	0,21	2,1	<b>1,7</b>
<b>AL10</b>	26,0	59,0	10,0	1,0	4,0	0,21	2,1	<b>2,2</b>
<b>AL11</b>	26,0	59,0	10,0	1,0	4,0	0,21	2,1	<b>2,2</b>
<b>Formulações- 10% de Ci</b>								
<b>AL12</b>	24,0	55,0	10,0	1,0	10,0	0,21	2,1	<b>2,4</b>
<b>AL13</b>	24,0	54,0	10,0	2,0	10,0	0,21	2,1	<b>2,3</b>
<b>AL14</b>	24,0	54,0	10,0	2,0	10,0	0,21	2,1	<b>2,8</b>

Nota: Foi Adicionado 5% de cal nas formulações AL11 e AL14.



**Gráfico 5.8. – Resistência à Compressão Simples X Cimento / R (sil/glut)**

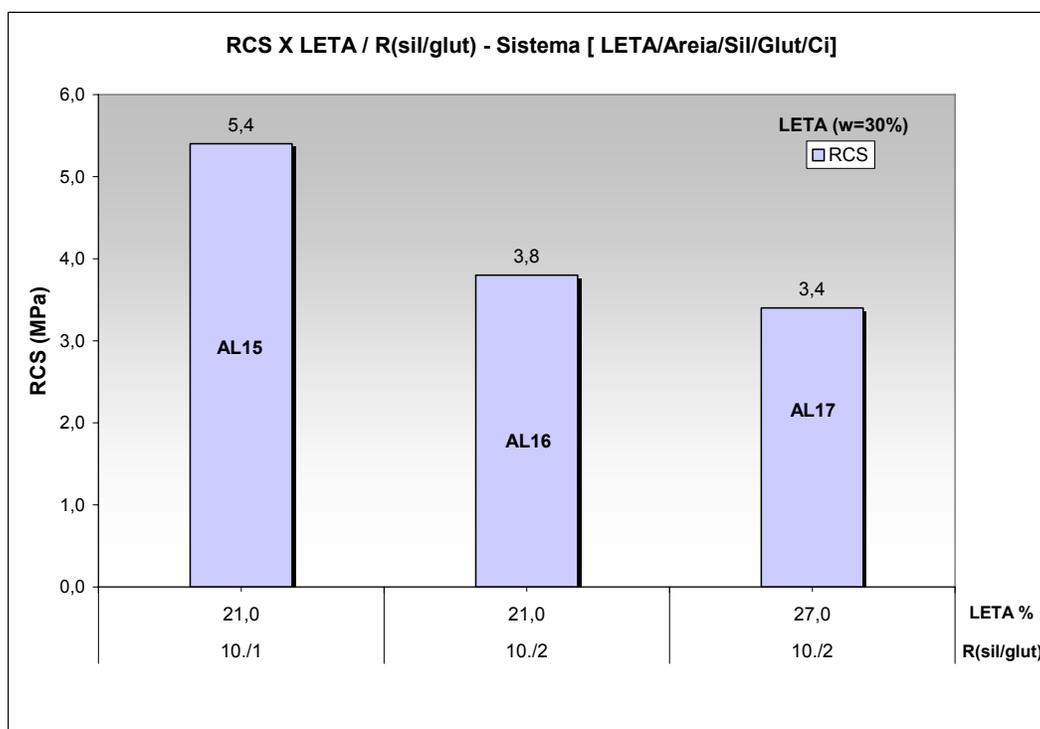
### 5.3.7. Sistema VII [LETA (w=30%)/Areia/Silicato/Glutaraldeido/Cimento]

Para estudo deste sistema optou-se pela adição do LETA com 30% de umidade e acréscimo de cimento. As Misturas apresentaram o teor de água variando de 22 a 25% e a Massa Específica Aparente Seca foi igual a 2,0g/cm<sup>3</sup>.

As formulações e resultados são apresentados na tabela 5.9.

**Tabela 5.9.- Resistências à Compressão Simples (RCS)**

Formulações								
CP	LETA(%)	Areia (%)	Sil (%)	Glut (%)	Ci(%)	F (a/s)	$\rho_a(g/cm^3)$	RCS(MPa)
AL15	21,0	62,0	10,0	1,0	6,0	0,22	2,0	<b>5,4</b>
AL16	21,0	59,0	10,0	2,0	6,0	0,23	2,0	<b>3,8</b>
AL17	27,0	55,0	10,0	2,0	6,0	0,25	2,0	<b>3,4</b>



**Gráfico 5.9 – Resistência à Compressão Simples (RCS) X LETA e R(sil/glut)**

Observa-se que o aumento do teor de cimento de 4% para 6% contribuiu para o aumento da RCS em todas formulações.

Nota-se que a razão (sil/glut) 10/1 do CP AL15 proporcionou uma resistência maior do que a razão (10/2) do CP AL16. Observa-se que o aumento da porcentagem do LETA no CP AL17 provocou o aumento do fator (água/sólidos) e conseqüentemente a diminuição da RCS.

### 5.3.8. Sistema VIII [LETA Seco/Silicato/Glutaraldeido/Cimento]

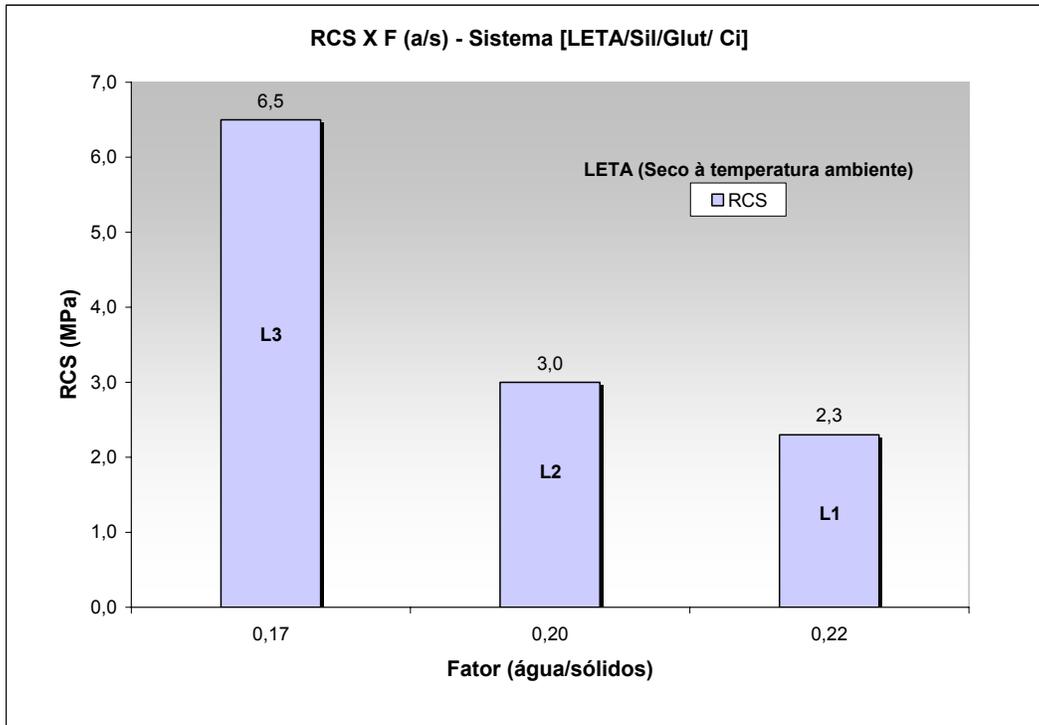
Para estudo deste sistema optou-se pela adição do LETA seco à temperatura ambiente.

Para proporcionar a capacidade adequada de compactação do material, foi adicionada água às formulações dos CP's L1, L2 e L3 em 2,5, 2,0 e 1,0ml respectivamente, de modo que as misturas apresentaram teores de água variando de 17 a 22% e a Massa Específica Aparente Seca foi igual a 2,1g/cm<sup>3</sup>.

As formulações e resultados são apresentados na tabela 5.10.

**Tabela 5.10 - Resistências à Compressão Simples (RCS)**

<b>Formulações</b>								
<b>CP</b>	<b>LETA(%)</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>Sil (%)</b>	<b>Glut (%)</b>	<b>Ci(%)</b>	<b>F (a/s)</b>	<b><math>\rho_d(g/cm^3)</math></b>	<b>RCS(MPa)</b>
<b>L1</b>	85,0	-	10,0	1,0	4,0	0,22	2,1	<b>2,3</b>
<b>L2</b>	85,0	-	10,0	1,0	4,0	0,20	2,1	<b>3,0</b>
<b>L3</b>	85,0	-	10,0	1,0	4,0	0,17	2,1	<b>6,5</b>



**Gráfico 5.10** – Resistência à Compressão Simples (RCS) x Fator (água/sólidos)

Neste sistema observa-se que com a diminuição do teor de água nas misturas com LETA seco houve um ganho apreciável de RCS (L3).

A formulação L3 indica claramente que a adição de areia ao LETA seco (ao ar) não se faz necessária para obtenção de valores de RCS condizentes com elementos estruturais.

### 5.3.9. Sistema IX [LETA Seco/Areia/Silicato/Glutaraldeido/Cimento]

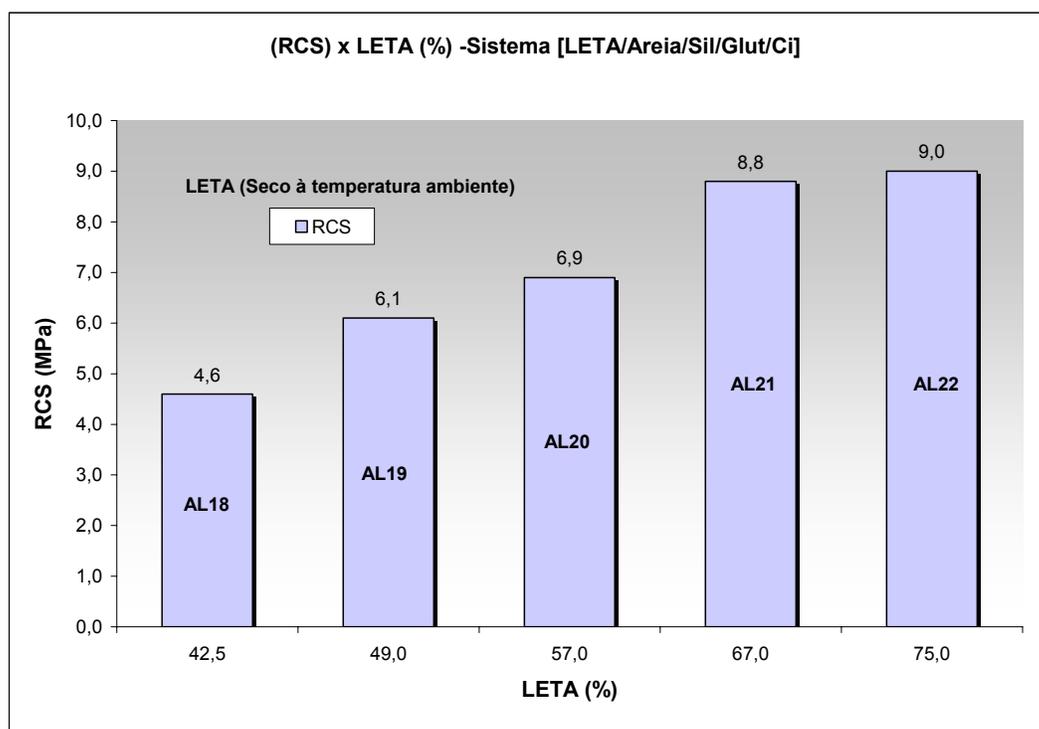
Para proporcionar a capacidade adequada de compactação do material, foi adicionado 1ml de água à formulação do CP L22. As Misturas apresentaram teores de água variando entre 13 e 14% e a Massa Específica Aparente Seca foi igual a 2,2g/cm<sup>3</sup>.

As formulações e resultados são apresentados na tabela 5.11.

**Tabela 5.11.- Resistências à Compressão Simples (RCS)**

Formulações								
CP	LETA(%)	Areia (%)	Sil (%)	Glut (%)	Ci(%)	F (a/s)	$\rho_d(g/cm^3)$	RCS(MPa)
AL18	42,5	42,5	10,0	1,0	4,0	0,13	2,2	<b>4,6</b>
AL19	49,0	36,0	10,0	1,0	4,0	0,13	2,2	<b>6,1</b>
AL20	57,0	28,0	10,0	1,0	4,0	0,13	2,2	<b>6,9</b>
AL21	67,0	18,0	10,0	1,0	4,0	0,13	2,2	<b>8,8</b>
AL22	75,00	10,0	10,0	1,0	4,0	0,14	2,2	<b>9,0</b>

O sistema IX difere do VIII pela presença de areia, o que ensejou formulações com mais baixo fator (água/sólidos) igual a 0,13. Sem dúvida, as resistências obtidas ( 4,6 e 9,0) MPa devem-se a essa particularidade.



**Gráfico 5.11 – Resistência à Compressão Simples (RCS) x LETA (%)**

Observa-se que à medida que se aumenta a quantidade do LETA seco, aumenta também a Resistência à Compressão Simples, porém, quando se utilizou somente o

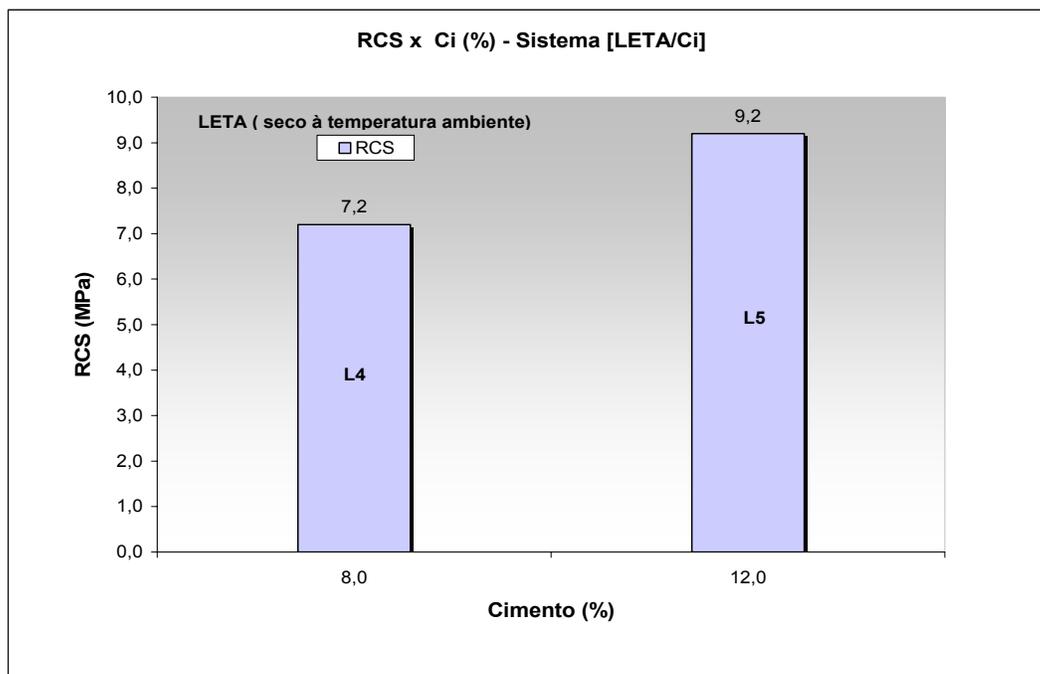
LETA no sistema anterior, formulação L3, a RCS foi menor, o que significa a importância da adição da areia, mesmo que em pequena proporção.

### 5.3.10. Sistema X [LETA Seco/Cimento]

Para proporcionar a capacidade adequada de compactação do material, foi adicionada 4ml de água às misturas. As Misturas apresentaram teor de água igual a 22% e a Massa Específica Aparente Seca foi igual a 2,1g/cm<sup>3</sup>. As formulações e resultados são apresentados na tabela 5.12.

**Tabela 5.12-** Resistência à Compressão Simples (RCS)

Formulações								
CP	LETA(%)	Areia (%)	Sil (%)	Glut (%)	Ci(%)	F (a/s)	$\rho_d(g/cm^3)$	RCS(MPa)
L4	92,0	-	-	-	8,0	0,17	2,1	7,6
L5	88,0	-	-	-	12,0	0,17	2,1	9,2



**Gráfico 5.12 –** Resistência à Compressão Simples (RCS) X Cimento (%)

A tabela 5.12 mostra que o LETA responde muito bem ao cimento. Não obstante, a sua porcentagem é o dobro da utilizada nos demais sistemas. Devido ao resultado do sistema [LETA / cimento] bem como a grande diversificação das formulações, faz-se necessário uma análise econômica, não só para analisar as composições mas também para avaliar todo processo de aproveitamento do resíduo.

A seguir são apresentadas as normas utilizadas como referência para análise dos melhores resultados obtidos neste estudo para valores das Resistência à Compressão Simples.

Normas brasileira e inglesa sobre blocos de solo-cimento sem função estrutural:

✓ NBR – 10834 – especifica como valores mínimos de RCS de solo-cimento sem função estrutural, com idade mínima de 7 dias para corpos de prova:

-Individual: 2,0 MPa

-Média: 2,5 MPa

✓ A norma Inglesa especifica para tijolos de solo-cimento o mínimo de 2,75 MPa.

Como não existe norma para blocos estruturais de solo-cimento, a título elucidativo, na tabela 5.13 encontram-se os requisitos de resistência à compressão para blocos estruturais de concreto e cerâmicos.

**Tabela 5.13 – Valores de RCS para blocos estruturais de concreto e cerâmicos.**

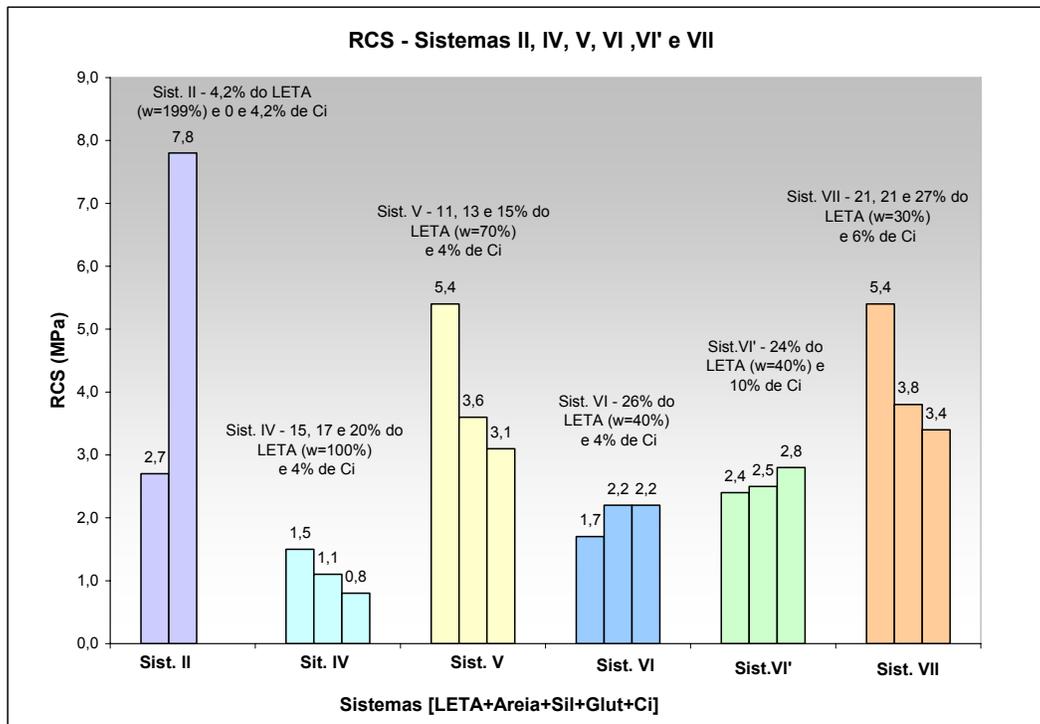
Produto		Requisito	Norma
Bloco de Concreto	Vedação	$f_i \geq 2,0\text{MPa}$ , $f_m \geq 2,5\text{Mpa}$	NBR - 7173
	Estruturais A	$f_{bk} \geq 6,0\text{MPa}$	NBR - 6136
	Estruturais B	$f_{bk} \geq 4,5\text{MPa}$	NBR - 6136
Bloco Cerâmico	Vedação (furos na horizontal)	$f_i \geq 1,5\text{MPa}$	NBR – 15270-1
	Vedação ( furos na vertical)	$f_i \geq 3,0\text{MPa}$	NBR – 15270-1
	Estrutural	$f_i \geq 3,0\text{MPa}$	NBR – 15270-2
Bloco Silico-Calcário	75	$f_m \geq 7,5\text{MPa}$	DIN - 106
	150	$f_m \geq 15\text{MPa}$	DIN - 106
	250	$f_m \geq 25\text{MPa}$	DIN - 106
	350	$f_m \geq 35\text{MPa}$	DIN - 106
Bloco Concreto Celular Autoclavado	G 25	$f_i \geq 2,0\text{MPa}$ , $f_m \geq 2,5\text{Mpa}$	DIN - 4165
	G 50	$f_i \geq 4,0\text{MPa}$ , $f_m \geq 5,0\text{Mpa}$	DIN - 4165
	G 75	$f_i \geq 6,0\text{MPa}$ , $f_m \geq 7,5\text{Mpa}$	DIN - 4165

Nota:  $f_{bk}$  = valor característico, abaixo do qual a probabilidade de 5% de ocorrerem resultados: calculados de acordo com a NBR – 6136.

$f_i$  = valor individual

$f_m$  = valor médio da amostra

Os resultados para formulações com utilização de diferenciados teores de umidade para o LETA são apresentados no gráfico 5.13.



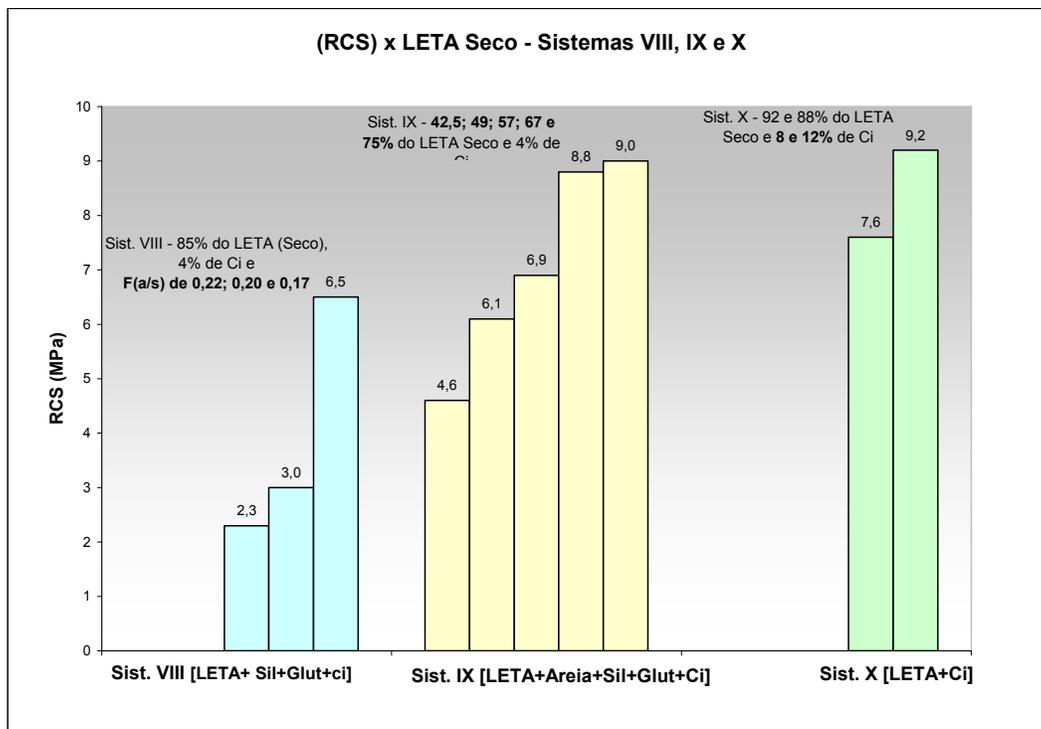
**Gráfico 5.13** – Comparativo das RCS's – Sistemas II, IV, V, VI, VI' e VII.

Os resultados para RCS do Sistema II (2,7 e 7,8) MPa mostram que a utilização do LETA com umidade igual a 199% estão acima dos indicados nas normas para blocos de vedação e estrutural, porém a utilização de pequena quantidade do resíduo (4,2%) não justifica sua aplicação. O Sistema IV (LETA com w=100%) apresentou resistências abaixo das indicadas nas normas. No Sistema V (LETA com w=70%) nota-se que com a diminuição da umidade do resíduo as RCSs (5,4, 3,6 e 3,1) MPa atingem patamares acima dos indicados pelas normas, mas, ainda com utilização de pequenas quantidades do LETA (11 a 15)%.

Não obstante a diminuição da umidade do LETA para 40%, aliada ao aumento da sua porcentagem para (24 e 26)% no Sistema VI, proporcionou a diminuição das RCS's.

No Sistema VII com utilização de 21% do LETA e umidade igual a 30% as RCS's (5,4, 3,8 e 3,4) MPa estão acima das indicadas pelas normas, tanto para blocos de vedação quanto para estruturais.

Observa-se que a medida que se diminui a umidade do LETA e ajusta-se as quantidades dos outros materiais, os resultados atingem patamares justificáveis para o presente estudo, que é a confecção de blocos estruturais. Fatos estes confirmados nos sistemas VIII, IX e X (Gráfico 5.14).



**Gráfico 5.14 – Comparativo das RCS's – Sistemas VIII, IX e X.**

## ***CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS***

### **6.1. Conclusões**

Resíduos com características semelhantes ao estudado podem ser promissores ao atendimento de demandas por tecnologias de baixo custo, associadas ao uso de solos estabilizados físico-quimicamente para fins de confecção de blocos para construção civil.

O silicato de sódio aliado ao glutaraldeído afeta o comportamento mecânico do resíduo estudado promovendo ganhos consideráveis na sua resistência à compressão simples.

As características do LETA de Cubatão são similares às da argila o que permite sua aplicação na fabricação de bloco cerâmico substituindo totalmente a argila.

A utilização do LETA de Cubatão como matéria-prima principal na fabricação de blocos, ou seja, com aproveitamento de 100% do resíduo, é viável, desde que seca e destorroada.

A proposta de formulações com adição de silicato e glutaraldeído é viável. A adição de cimento aumenta a Resistência Compressão Simples, porém, através dos resultados, verifica-se que dependendo do tipo de bloco , de vedação ou estrutural, o uso de cimento torna-se dispensável.

Nas formulações sem adição do LETA , ou seja, areia/sil/glut/ci, a razão sil/glut melhor foi de 10/2 e após a adição do resíduo, nota-se que esta razão foi de 10/1.

## **6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Trabalhar as formulações deste estudo, observando as Normas para que não haja uso excessivo de material.

Analizar economicamente a possibilidade de aproveitamento do resíduo com utilização de silicato/glutaraldeído e/ou cimento.

Realizar ensaios mais aprofundados, importantes para utilização de resíduos, para evitar futuramente danos ao meio ambiente.

Produzir em escala industrial blocos solo-cimento com o LETA.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Relatório Anual: Panorama sobre Resíduos Sólidos no Brasil em 2007*, 2008.

ADLER, E. *Drinking water sludges: overview in France in 2002*. In: Management of wastes from drinking water treatment, International Conference, Organised by The Chartered Institution of Water and Environmental Management, London, September 2002.

ÂNGULO, S.C., ZORDAN, S.E., JOHN, W.M., *Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil*, PCC-Departamento de Engenharia da Construção Civil da Escola Politécnica – EPUSP, São Paulo, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6136/1994, *Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural*, Rio de Janeiro, 1994.

-----NBR 6459: *Solo –Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro. 1984.

-----NBR 6474: *Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro. 1984.

-----NBR 7173/1982. *Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural*, Rio de Janeiro, 1982.

-----NBR 7175. *Cal Hidratada*. Rio de Janeiro, dez/2002.

-----NBR 7180: *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro. 1984.

-----NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro. 1984.

-----NBR 7251: *Solo – Determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro. 1982.

-----NBR 10004: *Resíduos Sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro. 2004.

-----NBR 10005: *Lixiviação de resíduos – Procedimento*. Rio de Janeiro. 2004

-----NBR 10006: *Solubilização de resíduos – Procedimento*. Rio de Janeiro. 2004.

-----, NBR 10007: *Amostragem de resíduos*. Rio de Janeiro. 2004.

-----, NBR 10834: *Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural - Especificação*, Rio de Janeiro.

-----, NBR 15270/2005. *Componentes cerâmicos – Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – terminologia e requisitos*. Rio de Janeiro, 2005.

-----, NBR 15270/2005. *Componentes cerâmicos – Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – terminologia e requisitos*. Rio de Janeiro, 2005.

-----, NBR 15270/2005. *Componentes cerâmicos – Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – métodos de ensaio*. Rio de Janeiro, 2005.

BRASIL, CASA CIVIL, Lei nº 6.938, 31 de Agosto de 1998. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/civil\\_03/leis/L6938org.htm](http://www.planalto.gov.br/civil_03/leis/L6938org.htm). Acesso em 23 de abril de 2008.

BRASIL, CASA CIVIL, Lei nº 9.605, 12 de Fevereiro de 1981. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/civil\\_03/leis/L9605org.htm](http://www.planalto.gov.br/civil_03/leis/L9605org.htm). Acesso em 23 de abril de 2008.

CASANOVA, F.J.O.C., *Fundamentos (mecanismo) da dosagem físico-química do solo-cimento*, 26ª RAPv, vol 1, pp 87, Aracajú-Se, 1992.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo*. São Paulo, CETESB. 2002.

CHADDA, L.R., “ *A Rapid Method of Assessing the Cement Requirement for the Stabilization of Soils*”, *India Concrete Journal*, 45(7), pp.298, 1970.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – Resolução nº 307, 05 de julho de 2002.

CORDEIRO, J., S., *Processamento do lodo de Estação de Tratamento de Água*, In: ANDREOLI, C., V. (Coord.), *Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final*, Rio de Janeiro, RIMA/ABES/PROSAB, 2001, Cap 5 p. 121-142.

CORDEIRO, J., S., *Micro-propriedades de Lodos gerados em decantadores de Estções de Tratamento de Água*, In: XXVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária y Ambiental, Cancun, México, 27 al 31 de octubre, 2002.

CORNWELL, D.; MUTTER, R. N.; VANDERMEYDEN, C. *Commercial application and marketing of water plant residuals*. AWWARF, AWWA, 2000.

DIN 106-*Sandlime bricks and blocks , facing bricks and hard-burnt facing bricks (blocos de silício – calcário)*, Beuth Verlag GmbH, Alemanha.

DIN 4165- *Autoclaved aerated concrete blocs and flat elements ( Bloco de concreto celular)*, Beuth Verlag GmbH, Alemanha

FAJARDO, B., *Aproveitamento de dois resíduos Industriais – Pó do corte do granito e do Catalisador do craqueamento do petróleo – na fabricação de elementos construtivos estruturais*, Dissertação (MSc – Engenharia Civil), COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

FERREIRA, R.C., FREIRE, W.J., *Propriedades físico-mecânicos de solos estabilizados com cimento e silicato de sódio avaliados por meio de testes destrutivos e não destrutivos*, Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v 23,pp 221-321, 2003.

FERREIRA, R.C, FREIRE,W.J., *Eficiência da estabilização do solo e qualidade de tijolos prensados de terra crua, tratada com aditivos químicos, avaliados pela combinação de testes destrutivos e não destrutivos*, Campinas/SP, 2004.

FERREIRA FILHO, S.S., SOBRINHO, P.A., *Considerações sobre o Tratamento de Despejos Líquidos Gerados em Estações de Tratamento de Água*, Revista Sanitária e Ambiental, ABES, vol 3, p 128-136, 1998.'

GARAY, A., *Caracterização da cal*, FIEP-Federação das Indústrias do Estado do Paraná, 2006. Disponível em <http://www.fiepr.org.br>. 2006. Acessado em 03 de março de 2008.

GUILHERMINO, R. L., *Estudo de laboratório de um resíduo catalisador de equilíbrio para utilização em alvenaria na construção civil*, Dissertação (MSc Engenharia Civil), COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro 2008.

IBGE, *Indicadores de Desenvolvimento Sustentável*, Agência Brasil, 2008.

JARDIM, F., *Destino Final dos Resíduos Sólidos*, Revista Gestão de Resíduos, nº 1, 2006.

JOHN, W. M., *Os Desafios da Construção Sustentável*. Disponível em <http://www.antac.org.br>, 2006. Acesso em 20 de março de 2008.

MEDINA, H.V., *Reciclagem de Materiais: Tendências Tecnológicas de um novo setor*. Tese de D.Sc., Engenharia de Produção da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, *Obtenção de areia artificial a partir de finos de pedreiras*, 2006, Disponível em <http://www.canalciencia.ibict.br>. Acesso em 5 de março de 2008.

OLIVEIRA, E. M. S., MACHADO, S. Q., HOLANDA, J.N. F., *Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha, Characterization of waterworks waste (sludge) aiming its use in red ceramic*, CCT-LAMAV, UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goitacazes, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

PAULSRUD, B.; STORHAUG, R.; HEM L. J. *Management of Wastes from Drinking Water Treatment in Norway*. In: Management of Wastes from Drinking Water Treatment. The Chartered Institution of Water and Environmental Management. London, UK., 2002.

RICHTER, C.A., *Tratamento de lodos de Estação de Tratamento de Água*, São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 2001.

ROCHA, J. C., CHERIAF, M., *Aproveitamento de resíduos na Construção*, Coletânea Habitare, Vol 4 – Utilização de resíduos na construção Habitacional, 2002.

SABBAG, M. G., MORITA, D. M., *Incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água em Blocos Cerâmicos*, 2002. Disponível em <http://www.bayer.com.br>. Acesso em 20 de maio de 2007.

SAMPAIO, A.O., *Projetos de lodos de estações de tratamento de água e de esgoto*, São Paulo, 2002. Disponível em <http://www.cmitepcj.sp.gov.br>. Acesso em 08 de julho de 2007.

SANTOS, I. S. S., RAMIRES, M. V. V., KAZMIERCZAK, C. S., KERN, A. P., CAMARGO, S. A. *Reciclagem do Resíduo(lodo) da Estação de Tratamento de Água do Município de São Leopoldo - RS* In: 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica 6º do Mercosul, 2001, Florianópolis. São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2001.

SÃO PAULO, Decreto Lei nº 8.468. 08 de setembro de 1976. Disponível em <http://www.controleambiental.com.br/decreto.8468htm>. Acesso em 03 de abril de 2008.

SBRIGHI NETO, C., HELENE, P., *O Processo Diagenético e sua Aplicação na Obtenção de Aglomerantes para a Construção Civil*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1993.

SIMPSON, A.; BURGESS, P.; COLEMAN, J. *The management of potable water treatment sludge: present situation in the UK*. In: Management of wastes from drinking water treatment, International Conference, Organised by The Chartered Institution of Water and Environmental Management, London, September 2002.

SINDUSCON, *Gestão Ambiental de Resíduo da Construção Civil, A experiência do Sinduscon-* São Paulo, 2005.

SINDUSCON – BA, Boletim Diário do Sinduscon-Ba, Edição nº 1623, 2008. Disponível em <http://www.sinduscon-ba.com.br/2008>. Acesso em 5 de março de 2008.

SOUZA, F.R., *Estudo da Eco-Eficiência de Argamassa e Concretos Reciclados com Resíduos de Estação de Tratamento de Água e de Construções e Demolições*, Dissertação de MSc, DECiv, UFSCar, São Carlos, SP, Brasil, 2006.

SPINELLI, M. B., *Alternativas na recuperação de áreas degradadas por extração de argila*, 2007.

WIECHETECK, G. K., CORDEIRO, J.,S., *Gestão Ambiental de Sistemas de Tratamento de Água*, In: XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancun, México, 27 al 31 de octubre, 2002.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)