

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DESEMPENHO MECÂNICO DO SOLO CONDICIONADO COM LODO DE  
ESGOTO CALCINADO**

**IEDO LOURENÇO MADALAZZO**

**CASCADEL – PR – BRASIL**

**2008**

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.



**IEDO LOURENÇO MADALOZZO**

**DESEMPENHO MECÂNICO DO SOLO CONDICIONADO COM LODO DE  
ESGOTO CALCINADO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola, curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso

**CASCADEL – PR – BRASIL**

**2008**



**Ficha catalográfica**  
**Bibliotecária Jeanine da Silva Barros - CRB-9/1362**

M178d Madalozzo, Iedo Lourenço  
Desempenho mecânico do solo condicionado com lodo de esgoto calcinado. / Iedo Lourenço Madalozzo. — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2008.  
83 f. ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso  
Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Mestrado em Engenharia Agrícola – área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.  
Bibliografia.

1. Resíduos. 2. Estabilização. 3. Desempenho mecânico. 4. Lodo de esgoto. I. Cardoso, Décio Lopes. II. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. III. Título.

CDD 21ed. 628.38  
CIP – NBR 12899

# **IEDO LOURENÇO MADALOZZO**

## **DESEMPENHO MECÂNICO DO SOLO CONDICIONADO COM LODO DE ESGOTO CALCINADO**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, pela comissão formada pelos professores:

Orientador: Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof. Dr. Everaldo Pletz  
Departamento de Estruturas, UEL

Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Hermínia Ferreira Tavares  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof<sup>a</sup>. Dr. Eduardo Godoy de Souza  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Cascavel, 27 de junho de 2008

## AGRADECIMENTOS

Ao Grande Arquiteto do Universo, por ser impulso e força em minha vida.

Aos meus pais, Júlio e Cecília Madalozzo, *in memorian*, meu amor infinito.

À Rosana, Taciana e Tanise, por serem meu porto-seguro, abrigo e ninho.

Ao acadêmico de Engenharia Civil e amigo Eduardo Damin, pela paciência, apoio e auxílio na realização dos trabalhos de laboratório.

À cunhada Renata, pela colaboração na realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso, pela amizade, apoio, incentivo e valiosas sugestões ao longo deste trabalho.

À União Dinâmica de Faculdades Cataratas – UDC, à SANEPAR, na pessoa do Engenheiro Jackson Archarde Gonçalves, à Cerâmica Santa Rita e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Aos meus familiares e amigos, próximos e distantes, celebrando nossa amizade.



Toda nossa dignidade consiste, pois, no  
pensamento.  
É a partir dele que nos devemos elevar e  
não do espaço e do tempo, que não  
saberíamos ocupar.

**Blaise Pascal**

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS.....	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
<u>1 INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
<u>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u>	<u>3</u>
<u>2.1 CARACTERIZAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE).....</u>	<u>3</u>
<u>2.2 PROCESSO GERAL DE TRATAMENTO EMPREGADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO OURO VERDE DE FOZ DO IGUAÇU.....</u>	<u>8</u>
<u>2.3 CARACTERIZAÇÃO DO REATOR ANAERÓBIO DE LODO FLUIDIZADO (RALF).....</u>	<u>9</u>
<u>2.4 SISTEMA DE SECAGEM.....</u>	<u>10</u>
<u>2.5 CALEAGEM.....</u>	<u>11</u>
<u>2.6 LODO DE ESGOTO.....</u>	<u>12</u>
<u>2.7 UTILIZAÇÃO INTERNACIONAL DO LODO DE ESGOTO.....</u>	<u>13</u>
<u>2.8 A UTILIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO NO BRASIL.....</u>	<u>14</u>
<u>2.9 O LODO DO ESGOTO NO ESTADO DO PARANÁ.....</u>	<u>15</u>
<u>2.10 O LODO DO ESGOTO EM FOZ DO IGUAÇU.....</u>	<u>16</u>
<u>2.11 CONDICIONAMENTO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLO.....</u>	<u>16</u>
<u>2.12 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS.....</u>	<u>18</u>
<u>2.12.1 Massa específica.....</u>	<u>18</u>
<u>2.12.2 Densidade aparente.....</u>	<u>18</u>
<u>2.12.3 Granulometria.....</u>	<u>19</u>
<u>2.12.4 Desempenho Mecânico dos Compostos.....</u>	<u>19</u>
<u>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</u>	<u>23</u>
<u>3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO EXPERIMENTO.....</u>	<u>23</u>

<u>3.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO (LODO DE ESGOTO).....</u>	<u>23</u>
<u>3.2.1 Caracterização do lodo de esgoto caledo.....</u>	<u>23</u>
<u>3.2.2 Caracterização do lodo de esgoto calcinado.....</u>	<u>27</u>
<u>3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....</u>	<u>28</u>
<u>3.4 COLETA DAS AMOSTRAS UTILIZADAS.....</u>	<u>29</u>
<u>3.4.1 Coleta das amostras de solo.....</u>	<u>29</u>
<u>3.4.2 Coleta das amostras de lodo de esgoto caledo.....</u>	<u>29</u>
<u>3.4.3 Dosagem dos compostos.....</u>	<u>29</u>
<u>3.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS.....</u>	<u>30</u>
<u>3.5.1 Massa específica.....</u>	<u>30</u>
<u>3.5.2 Densidade aparente.....</u>	<u>31</u>
<u>3.5.3 Granulometria.....</u>	<u>31</u>
<u>3.6 DESEMPENHO MECÂNICO DOS COMPOSTOS.....</u>	<u>32</u>
<u>3.6.1 Índice de compactação.....</u>	<u>32</u>
<u>3.6.2 Índice de retração.....</u>	<u>33</u>
<u>3.6.3 Ensaio de compressão triaxial.....</u>	<u>34</u>
<u>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</u>	<u>44</u>
<u>4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS COMPOSTOS.....</u>	<u>44</u>
<u>4.1.1 Massa específica dos sólidos.....</u>	<u>44</u>
<u>4.1.2 Frações texturais dos compostos.....</u>	<u>45</u>
<u>4.1.3 Densidade aparente.....</u>	<u>46</u>
<u>4.1.4 Curvas granulométricas dos compostos.....</u>	<u>48</u>
<u>4.2 DESEMPENHO MECÂNICO DOS COMPOSTOS.....</u>	<u>54</u>
<u>4.2.1 Índice de compactação.....</u>	<u>54</u>
<u>4.2.2 Índice de retração.....</u>	<u>56</u>
<u>4.2.3 Resistência ao cisalhamento na compressão triaxial.....</u>	<u>57</u>
<u>4.2.4 Envoltórias de ruptura para ensaios triaxiais consolidados não drenados (Círculos de Mohr).....</u>	<u>63</u>
<u>4.2.5 Coesão dos compostos em função do teor de LEC.....</u>	<u>66</u>
<u>4.2.6 Ângulo de atrito interno dos compostos em função do teor de LEC.....</u>	<u>67</u>
<u>4.2.7 Comportamento tensão-deformação dos compostos.....</u>	<u>68</u>
<u>4.3 PLANOS DE RUPTURA NOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL.....</u>	<u>74</u>
<u>5 CONCLUSÕES.....</u>	<u>76</u>



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos do ângulo de atrito drenado para areias e siltes....	22
Tabela 2 - Características do lodo de esgoto caledado em estudos realizados a pedido da SANEPAR, com amostras coletadas no ano 2007 (limites permitidos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 380/2006).....	24
Tabela 3 - Teor de matéria orgânica em lodo caledado, de acordo com o ensaio realizado em laboratório, conforme a NBR 13600 (ABNT, 1996) .....	25
Tabela 4 - Laudo técnico de parâmetros agronômicos.....	27
Tabela 5 - Laudo técnico de parâmetros de metais pesados.....	28
Tabela 6 - Dosagem do composto em massa (%).....	30
Tabela 7 - Frações constituintes de solo segundo a escala granulométrica brasileira.....	32
Tabela 8 - Massa específica dos sólidos dos compostos.....	44
Tabela 9 - Tabela comparativa granulométrica.....	46

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema completo de uma lagoa de estabilização.....	4
Figura 2 - Esquema funcional do lodo ativado.....	7
Figura 3 - Fluxograma ETE Ouro Verde de Foz do Iguaçu.....	8
Figura 4 - Esquema de funcionamento de um RALF.....	9
Figura 5 - Gráfico da queima do lodo de esgoto (processo de calcinação).....	26
Figura 6 - Esquema do processo de produção do lodo de esgoto calcinado..	26
Figura 7 - Extração do corpo-de-prova do ensaio de Proctor.....	33
Figura 8 - Foto ilustrativa do teste da caixa, utilizado para determinação do índice de retração.....	34
Figura 9 - Ilustração do ensaio de compactação dos corpos-de-prova.....	35
Figura 10 - Foto do mini MCV, aparelho utilizado para a moldagem dos corpos-de-prova de propriedade do DER (Departamento de Estradas e Rodagem).....	35
Figura 11 - Esquema de um aparelho de compressão triaxial.....	36
Figura 12 - Imagem da preparação do corpo-de-prova com uma pedra porosa em cada extremidade, antes da colocação da célula triaxial.....	36
Figura 13 - Célula de compressão triaxial de solo.....	37
Figura 14 - (a) Aplicação da tensão principal $\sigma_1$ e da tensão de confinamento $\sigma_3$ ; (b) corpo-de-prova rompido; (c) Círculo de Mohr e envoltória de Coulomb.....	38
Figura 15 - Leitura da densidade da partícula dos compostos.....	45
Figura 16 - Ilustração da tabela comparativa granulométrica.....	46
Figura 17 - Gráfico demonstrativo da densidade aparente dos compostos.....	47
Figura 18 - Curva granulométrica do tratamento T0.....	48
Figura 19 - Curva granulométrica do tratamento T1.....	49
Figura 20 - Curva granulométrica do tratamento T2.....	50
Figura 21 - Curva granulométrica do tratamento T3.....	51
Figura 22 - Curva granulométrica do tratamento T4.....	52
Figura 23 - Curva granulométrica de todos os tratamentos.....	53

Figura 24 - Curvas de compactação dos tratamentos.....	55
Figura 25 - Índice de retração dos tratamentos.....	57
Figura 26 - Efeito dos tratamentos e do confinamento no módulo de elasticidade longitudinal.....	59
Figura 27 - Gráfico ilustrativo do Coeficiente de Poisson.....	60
Figura 28 - Comportamento da tensão principal maior de ruptura.....	61
Figura 29 - Comportamento do módulo de elasticidade transversal.....	62
Figura 30 - Círculo de Mohr para o composto T0.....	63
Figura 31 - Círculo de Mohr para o composto T1.....	64
Figura 32 - Círculo de Mohr para o composto T2.....	64
Figura 33 - Círculo de Mohr para o composto T3.....	65
Figura 34 - Círculo de Mohr para o composto T4.....	65
Figura 35 - Comportamento da coesão dos compostos em função do teor de LEC.....	66
Figura 36 - Comportamento do ângulo de atrito interno dos compostos em função do teor de LEC.....	67
Figura 37 - Comportamento tensão-deformação para o tratamento T0.....	69
Figura 38 - Comportamento tensão-deformação para o tratamento T1.....	70
Figura 39 - Comportamento tensão-deformação para o tratamento T2.....	71
Figura 40 - Comportamento tensão-deformação para o tratamento T3.....	72
Figura 41 - Comportamento tensão-deformação para o tratamento T4.....	73
Figura 42 - Imagem dos corpos-de-prova rompidos após a compressão triaxial.....	75

## LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETESB	– Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
DBO	– Demanda bioquímica de oxigênio
E	– Módulo de elasticidade longitudinal
ETE	– Estação de tratamento de esgoto
G	– Módulo de elasticidade transversal
$I_r$	– Índice de retração
K	– Módulo de deformação volumétrica
LEC	– Lodo de esgoto calcinado
$L_f$	– Comprimento final
$L_i$	– Comprimento inicial
M.O.	– Teor de matéria orgânica
M.O. <sub>médio</sub>	– Teor de matéria orgânica médio
$M_{anel}$	– Massa do anel vazio
$M_{cc}$	– Massa do conjunto completo com composto
P	– Força normal
$V_{anel}$	– Volume do anel
$\delta_{ap}$	– Densidade aparente
c	– Coesão do solo
TFSA	– Terra fina seca ao ar
TFSE	– Terra fina seca em estufa
T0	– Solo testemunha
T1	– Composto com 8% de lodo de esgoto calcinado
T2	– Composto com 17,5% de lodo de esgoto calcinado
T3	– Composto com 28,5% de lodo de esgoto calcinado
T4	– Composto com 43% de lodo de esgoto calcinado
T5	– Composto com lodo de esgoto calcinado testemunha
SANEPAR	– Companhia de Saneamento do Estado do Paraná
USEPA	– <i>U.S. Environmental Protection Agency</i>



## RESUMO

Dentre os problemas globais que mais suscitam estudos e soluções frente à crise ambiental, despontam os referentes ao destino dos resíduos gerados e o esgotamento sanitário. O desenvolvimento sustentável pressupõe a criação de soluções que visem à diminuição ou eliminação dos impactos sobre o ambiente. Os resíduos podem passar de problema à solução de engenharia. Este estudo tem a finalidade de unir dois problemas e encontrar uma solução única que atenda à questão ambiental e à questão de engenharia de solos. No contexto atual, quanto à gestão ambiental e ao uso racional de materiais, uma das prioridades é a redução dos resíduos produzidos pelas indústrias. A redução dessa produção é possível, mas não a sua total extinção, por isso a necessidade de tornar útil este resíduo, para o seu total reaproveitamento. O uso de resíduos sólidos no condicionamento dos solos (ABNT NBR 5776) é o foco deste estudo, que tem como finalidade o uso racional dos resíduos relacionados à necessidade de reutilização, ao teor ideal de resíduos para o melhor desempenho e ao baixo custo, conseguindo assim o melhoramento das características físicas e do desempenho mecânico do solo da Região Oeste do Paraná. O material proposto para estudo é o lodo de esgoto seco (Classe I da ABNT NBR 10004). O lodo de esgoto é todo o resíduo sólido extraído durante o tratamento de águas residuais para a eliminação nas coleções hídricas. Para a determinação da relação resíduo/solo ideal o solo *in natura* foi aditivado com resíduo em quatro proporções de tratamento em massa 0%, 8%, 17,5%, 28,5% e 43%. Para a realização dos ensaios as amostras de solo aditivado e *in natura* foram preparadas conforme a norma da ABNT NBR 6457. Os ensaios de caracterização e de desempenho do solo foram realizados conforme as normas da ABNT. Após o processo de adição ocorreu um acréscimo considerável no índice máximo de compactação e uma diminuição expressiva nos vazios do solo, gerando uma rigidez dos compostos em função do incremento do lodo de esgoto calcinado, melhorando consideravelmente sua estabilização e desempenho mecânico.

**Palavras-chave:** resíduos, estabilização, desempenho mecânico.

## ABSTRACT

### MECHANICAL PERFORMANCE OF THE SOIL CONDITIONED WITH BURNED SEWAGE SLUDGE

Amongst the global problems that most rouse studies and solutions before the environment crisis arise the ones concerning the destination of waste and the sewage system. The sustainable development requires the creation of solutions aiming the reduction or the elimination of the impacts on the environment. The waste may become an Engineering solution. The aim of this work is to unite two problems and find a unique solution that answers both to the environmental question and to the soil engineering one. Considering the present situation of environmental management and rational use of substance, one of the priorities nowadays is the reduction of the industrial waste. The reduction of such waste is possible, although its complete elimination is not and, therefore, comes the necessity of transforming this waste into something useful. The use of solid wastes on the soil treatment (ABNT NBR 5776) is the focus of this work, which has the purpose of demonstrating the rational use of the wastes related to the necessity of their reutilization, the ideal tenor of the wastes for a better performance and low cost, accomplishing the improvement of the physical characteristics and the mechanic performance of the soil of West Paraná. The proposed material for this work is the dry sewage sludge (Class I of ABNT NBR 10004). Sewage sludge can be defined as every solid waste extracted during the treatment of residual water to the elimination in water collect. In order to determine the relation waste/ideal soil, the *in natura* soil was added with waste in four parts of 0%, 8%, 17,5%, 28,5% and 43%. So as to carry out the experiences the samples of added soil and *in natura* soil were prepared according to the regulations of ABNT NBR 6457. The experiences of the soil's characterization and performance were accomplished under ABNT rules. After the addition process there was a considerable increase on the maximum compactation level and an excessive decrease on the empty spaces of the soil, generating a hardness of the compounds due to the addition of burned sewage sludge, improving considerably the stabilization and the mechanic resistance of the soil.

**Key-words:** wastes, stabilization, mechanical performance.



## 1 INTRODUÇÃO

A disposição final do lodo de esgoto caracteriza atualmente um sério problema ambiental, tanto em países desenvolvidos quanto naqueles em desenvolvimento, como reflexo da ampliação das redes de coleta e tratamento.

O lodo de esgoto é um subproduto das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) de cidades e indústrias, o qual, após devidamente tratado e seco, é denominado biossólido e constitui o principal subproduto do processo de depuração de águas residuais. É um resíduo altamente poluente, cuja disposição inadequada questiona a própria efetividade das ações de saneamento. No Estado do Paraná, a questão representa um problema emergente impulsionado pelas políticas de expansão das redes de coleta, implantação de novas estações de tratamento de esgoto e a operação efetiva dos sistemas já instalados, que vem ocorrendo nos últimos anos. A Companhia de Saneamento do Estado do Paraná (SANEPAR) é a principal operadora dos serviços de saneamento no Estado. De acordo com o órgão, a companhia presta serviços de fornecimento de água tratada em 344 sedes municipais e em 270 distritos ou localidades de menor porte, atendendo, ao todo, 8,3 milhões de pessoas com água tratada e alcançando um índice de cobertura de 98,6% da população urbana em sua área de concessão. Em termos de esgotamento sanitário, a companhia atende 146 localidades, totalizando 4,1 milhões de pessoas com acesso à rede coletora de esgotos mantida pela companhia. O atendimento com serviços de esgotamento alcança 48,7% da população urbana na área de concessão. Do volume de esgotos coletados, 94,5% recebe tratamento (SANEPAR, 2008). Atualmente, as alternativas de disposição do lodo de esgoto mais comuns são a descarga oceânica, os aterros sanitários e a reciclagem agrícola.

A composição do lodo varia muito em função da origem do esgoto: basicamente, o lodo de esgoto é constituído de matéria orgânica e metais pesados. O lodo possui um alto nível de patógenos e deve ser higienizado

antes de ser disposto, o método mais comum é o tratamento com cal (caleação), podendo-se também calcinar o lodo, o que eliminaria a matéria orgânica. A presença de determinados elementos químicos metálicos no lodo indica a possibilidade de sua utilização como condicionador das propriedades de engenharia dos solos que exibam acentuada atividade química, tal como o solo argiloso do Oeste do Paraná.

A estabilização química de um solo refere-se às alterações produzidas na sua estrutura pela introdução de certa quantidade de aditivo, suficiente para melhorar as propriedades físicas e mecânicas do solo, possibilitando o seu emprego para fins de projeto. A literatura aponta uma série de aditivos químicos utilizados como estabilizante de solos, podendo ser desde produtos industrializados, até subprodutos ou resíduos industriais (FRANÇA, 2003).

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência do lodo de esgoto proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto Ouro Verde, da cidade de Foz do Iguaçu, na resistência mecânica e compressibilidade do solo. A finalidade é dar uma destinação nobre a um resíduo altamente poluidor, utilizando-o como estabilizador para o solo argiloso da Região Oeste do Paraná.

Neste trabalho será feita uma tentativa de utilização do referido lodo adicionando-o ao Latossolo Vermelho Distroférico do Oeste do Paraná, como possibilidade de melhoramento das propriedades mecânicas deste solo.

O tema proposto justifica-se por sua relevância atual, no sentido de buscar uma alternativa sustentável para a disposição de um resíduo poluidor, aplicando-o na melhoria das propriedades de engenharia do solo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 CARACTERIZAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE)**

O tratamento dos esgotos, que irá proteger o meio ambiente não poluindo os solos, rios e mares, resulta na produção de um lodo rico em matéria orgânica e nutrientes, denominado lodo de esgoto ou biossólido, que necessita de uma adequada disposição final. Uma estação de tratamento convencional tem, basicamente, a finalidade de promover o tratamento de esgotos domésticos, dando-lhes condições de serem lançados aos rios, riachos, lagos ou mar. Os esgotos são encaminhados à Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), onde, de início, são retiradas as impurezas mais grosseiras (sólidos, gorduras e areia), para posteriormente ser removida a matéria orgânica, complementando-se o tratamento, eventualmente, com a adição de cloro como forma de desinfecção. Os efluentes, também chamados de águas residuárias, são lançados por um emissário ao seu destino final, com um elevado índice de purificação. A formação de lodo, que é a parte sólida restante do tratamento, tem eventual utilização como adubo, após ter sido convenientemente tratado.

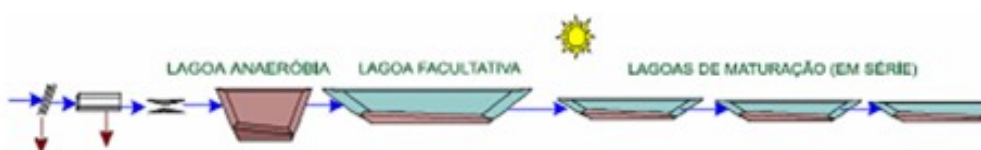
Povos mais antigos, como os babilônicos, por exemplo, já construíam sistemas de esgoto; privadas já eram conhecidas pelos egípcios; os gregos desenvolveram as duchas e, mais tarde, os banhos públicos. Nesse momento histórico, portanto, a higiene e o saneamento já eram consideravelmente bem desenvolvidos. Durante certa época da Idade Média, porém, conta-se que ocorreu uma grande epidemia atribuída pelos sábios ao hábito de se tomar banho. Assim, através de uma lei, o banho foi proibido. Na realidade, o que ocorria era que, em razão das precárias condições de saneamento de então, as doenças se multiplicavam rapidamente, provocando epidemias. Há uma

clara e íntima relação entre a saúde e as condições de saneamento. (CANTELE, 1989)

O conceito de saneamento, entretanto, ganha a sua expressão maior quando a visão é ampliada e a atenção é estendida a outros aspectos envolvidos, além de propiciar saúde e melhoria dos padrões de vida do homem. Assim, é preciso pensar também em termos de melhoria de produtividade, valorização das terras e possibilidade de uso dos cursos d'águas para recreação.

A ETE é o conjunto de instalações e equipamentos destinados a realizar o tratamento de esgoto sanitário, compondo-se basicamente de grades, caixas de areia, decantador primário, lodos ativados e/ou filtro biológico, decantador secundário e secagem do lodo proveniente dos decantadores. Normalmente, esse processo requer pouca área, apresenta custos de construção relativamente altos e possui índices de eficiência elevados (SANEPAR, 1999).

De acordo com CASTRO, COSTA & CHERNICHARO (2007), os processos de tratamento de esgotos podem ser divididos entre sistemas simplificados (sem mecanização), caracterizados por lagoas de estabilização, disposição no solo e reatores anaeróbios e sistemas mecanizados, caracterizados por lagoas de estabilização com aeração, filtros biológicos e lodos ativados. Na Figura 1 destacam-se na os principais processos utilizados.



**Figura 1** - Esquema completo de uma lagoa de estabilização.

Fonte: VON SPERLING (1996).

Os sistemas de esgoto se caracterizam por:

- Lagoas de estabilização (sem aeração): as principais variantes destas lagoas são as denominadas lagoas facultativas, construídas de forma simples, com diques de terra. Os esgotos entram numa extremidade e saem na

extremidade oposta. A matéria orgânica, na forma de sólidos em suspensão, vai para o fundo da lagoa, onde forma uma camada de lodo, que vai, aos poucos, sendo estabilizada através das bactérias presentes. Na parte superior da lagoa ocorre a estabilização, por bactérias, da matéria orgânica que não sedimenta. O oxigênio necessário para a respiração das bactérias é fornecido por algas, que fazem a fotossíntese. Para as algas crescerem é necessário que haja insolação suficiente. Os sistemas de lagoas requerem grandes áreas superficiais, muitas vezes não disponíveis na localidade. Há, portanto, necessidade de se buscar soluções alternativas que possam trazer uma redução da área total requerida. Uma variante do sistema de lagoas é o de lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas. Nas primeiras lagoas, de pequenas dimensões, predominam as reações anaeróbias, as quais ocorrem na ausência de oxigênio. Com a remoção de, aproximadamente, 50 a 60% da matéria orgânica nas lagoas anaeróbias, as lagoas facultativas que seguem podem ser bem menores. A área total ocupada é em torno de 2/3 da área ocupada por uma lagoa facultativa única. O sistema de lagoas é também eficiente na remoção de patógenos.

- Disposição no solo: os esgotos são aplicados ao solo, fornecendo água e nutrientes necessários para o crescimento das plantas. Parte do líquido evapora, parte pode infiltrar-se no solo e parte é absorvida pelas plantas. Em alguns processos, a infiltração no solo é elevada e não há efluente. Em outros, a infiltração é baixa, saindo esgotos (tratados) na extremidade oposta do terreno. Os esgotos podem ser aplicados ao solo por meio de aspersores, valas, canais, alagamento, entre outros. Os sistemas de disposição no solo requerem áreas superficiais bastante elevadas.

- Sistemas anaeróbios: o tratamento anaeróbio é efetuado por bactérias que não necessitam de oxigênio para a sua respiração. Há dois tipos bastante comuns em nosso meio: o filtro anaeróbio e o reator anaeróbio de manta de lodo. Ambos os processos requerem pouca área para a sua implantação.

- Filtro anaeróbio: a matéria orgânica é estabilizada por bactérias aderidas a um meio suporte (usualmente pedras) em um tanque. O tanque trabalha afogado e o fluxo do líquido se dá de baixo para cima. O sistema requer decantação primária (frequentemente fossas sépticas).



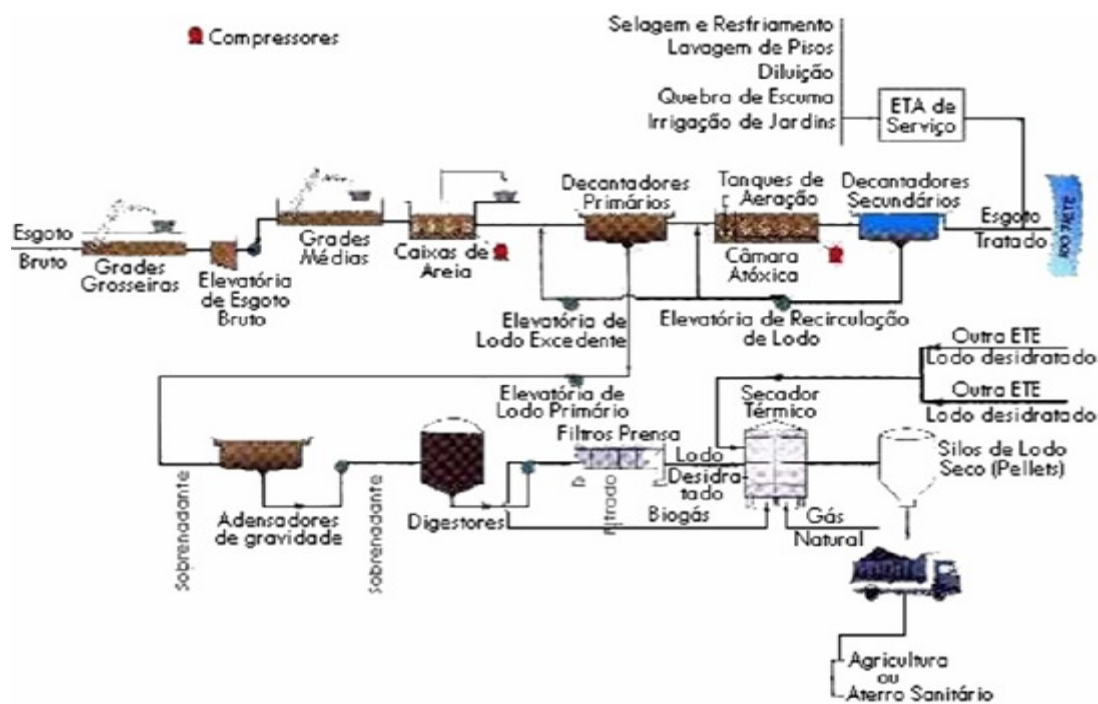
- Reator anaeróbio de manta de lodo: a matéria orgânica é estabilizada por bactérias dispersas no tanque. O fluxo do líquido se dá de baixo para cima. A parte superior do tanque é dividida em zonas de sedimentação e zonas de coleta de gás. Entre os gases formados inclui-se o metano. O sistema dispensa decantação primária, mas usualmente necessita de uma unidade de pós-tratamento.

- Lagoas de estabilização aeradas: os mecanismos de remoção da matéria orgânica são similares aos de uma lagoa facultativa. No entanto, o oxigênio é fornecido por equipamentos mecânicos, denominados aeradores. Em alguns tipos de lagoas aeradas (lagoas aeradas facultativas), os sólidos dos esgotos e as bactérias sedimentam, indo para o lodo do fundo. Em outros (lagoas aeradas de mistura completa), os sólidos e as bactérias permanecem em suspensão, necessitando serem removidos para uma lagoa de decantação posterior. Os sistemas de lagoas aeradas requerem menos área do que os sistemas naturais, porém mais área do que os demais sistemas mecanizados.

- Filtros biológicos: a matéria orgânica é estabilizada por bactérias que crescem aderidas a um meio suporte (comumente pedras, mas também pode ser utilizado meio sintético). O esgoto é aplicado na superfície do tanque por meio de distribuidores rotativos. O líquido percola pelo tanque, saindo pelo fundo, enquanto que a matéria orgânica fica retida pelas bactérias. Os espaços livres entre as pedras são vazios, o que permite a circulação de ar. Este sistema necessita de decantação primária. Em algumas variantes do sistema, o líquido efluente do decantador final (decantador secundário) é recirculado para os filtros. Os filtros biológicos requerem uma área inferior à das lagoas mecanizadas.

- Lodos ativados: a matéria orgânica é removida por bactérias que crescem dispersas em um tanque (tanque de aeração). A biomassa (bactérias) do tanque de aeração sedimenta em um decantador final (decantador secundário), permitindo que o efluente saia clarificado para o corpo receptor. O lodo que se sedimenta no fundo do decantador secundário é retornado, por bombeamento, ao tanque de aeração, aumentando a eficiência do sistema. O fornecimento de oxigênio é feito artificialmente ou por aeradores mecânicos superficiais ou, ainda, por tubulações de ar no fundo do tanque. Algumas variantes do processo requerem ou não decantadores primários. Alguns

sistemas de lodos ativados operam continuamente, enquanto outros operam de forma intermitente, como mostrado na Figura 2. Os sistemas de lodos ativados requerem reduzidas áreas para a sua implantação.



**Figura 2 -** Esquema funcional do lodo ativado.

Fonte: BARROS (1986).

Em sistemas com remoção freqüente de lodo, seu tratamento e disposição final são partes integrantes e fundamentais do processo de tratamento de esgotos. Ampla atenção deve ser dada à questão, muitas vezes de difícil resposta, sobre o que fazer com o lodo, após o seu tratamento.

O tratamento do lodo tem basicamente dois objetivos: redução do volume (pela redução da umidade) e a redução do teor de matéria orgânica (pela estabilização do lodo). Para se alcançar tais objetivos, o tratamento do lodo usualmente inclui uma ou mais das seguintes etapas:

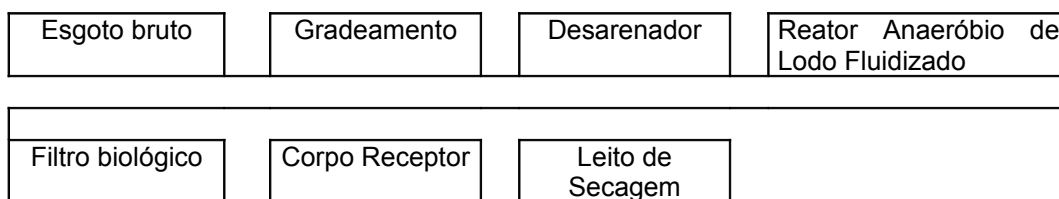
- a) adensamento: redução de umidade (lodo ainda líquido);
- b) estabilização: redução da matéria orgânica;
- c) desidratação: redução adicional da umidade (lodo sólido).

Apesar da alternativa mais comum para a disposição final do lodo ser a do aterro sanitário, é preciso ter sempre em mente a possibilidade de sua utilização na agricultura, como fertilizante e recompositor da camada superficial de solo. Ao se investigar esta alternativa, deve-se avaliar com cuidado a possibilidade de transmissão de doenças no círculo lodo – vegetais – homem (CASTRO; COSTA & CHERNICHARO, 2007).

## 2.2 PROCESSO GERAL DE TRATAMENTO EMPREGADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO OURO VERDE DE FOZ DO IGUAÇU

De acordo com WEBER (2008), a ETE Ouro verde tem vazão média de operação de 40 litros por segundo e 75% de eficiência na remoção da carga orgânica do resíduo, produzindo, anualmente, 20 toneladas de lodo, com potencial para ser utilizado como fertilizante agrícola. Em maio de 2008 a ETE Ouro Verde foi inaugurada como projeto piloto de geração de biogás, transformando o gás metano, produzido no tratamento anaeróbico do lodo de esgoto, em energia elétrica.

Os sistemas de tratamento de esgotos empregados pela unidade de Foz do Iguaçu seguem o fluxo apresentado na Figura 3.

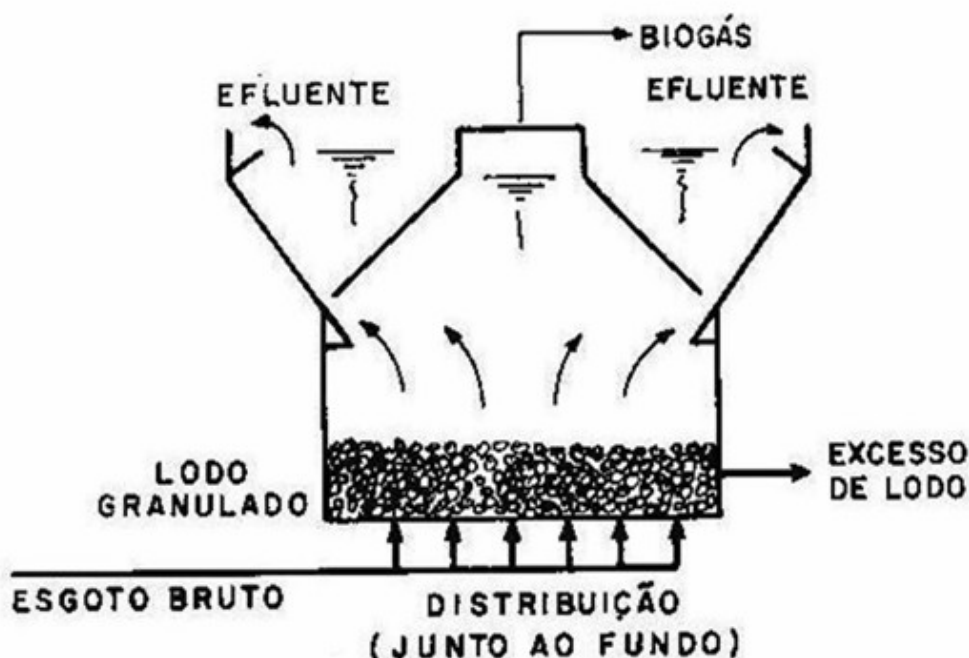


**Figura 3** - Fluxograma ETE Ouro Verde de Foz do Iguaçu.

Nesta estação, o esgoto bruto passa pelas unidades de gradeamento e desarenação, depois pela caixa de distribuição, de onde segue para os reatores anaeróbios. O lodo retirado dos reatores é então encaminhado aos leitos de secagem, onde, por processos de infiltração e evaporação, o resíduo é desidratado.

### 2.3 CARACTERIZAÇÃO DO REATOR ANAERÓBIO DE LODO FLUIDIZADO (RALF)

O Reator Anaeróbico de Lodo Fluidizado (RALF), mostrado na Figura 4, é um sistema de tratamento que apresenta eficiência média de 70% e tem baixo custo de implantação e operação (SANEPAR, 1997).



**Figura 4** - Esquema de funcionamento de um RALF.

Fonte: AZEVEDO NETTO & BOTELHO (1991).

O RALF é uma unidade de tratamento que possui, em sua parte inferior, uma câmara de reação na qual se desenvolve um manto de lodo com alta concentração de microorganismos anaeróbios, que é atravessado pelo esgoto, em fluxo ascendente, quando a matéria orgânica é, em boa parte, utilizada por esses microorganismos, produzindo gás ( $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ ) e um pouco

de novos microorganismos, resultando em uma mistura de sólidos (SS), líquido e gás, que sobe pelo reator para a parte superior do RALF, onde encontra a zona de decantação, separada da câmara de reação e também a câmara de gás, logo acima da câmara de reação (ALEM, 2001).

O relatório da área operacional das ETES de Curitiba relata que, na entrada da câmara de decantação existe um separador de gases, impedindo que eles sejam encaminhados para a câmara de gás (SANEPAR, 2002).

Na câmara de decantação os SS se separam do líquido e sedimentam até encontrarem as paredes da câmara, que têm inclinação superior a 50° (ALEM & KATO, 1999), por onde descem para retornar à câmara de reação. Os gases que são removidos pela superfície da unidade, bem como o lodo que é produzido pela retenção de sólidos do esgoto e pelo crescimento biológico são removidos da unidade a partir do manto de lodo da câmara de reação.

Esses sistemas vêm demonstrando grande aplicabilidade com eficiência de remoção de DBO na faixa de 55% a 75%, resultando em um efluente com DBO na faixa mais usual de 60 a 120 mg/l (ALEM, 2001).

É necessário mencionar que, para um mesmo efluente, o processo anaeróbio gera um volume de lodo 20% menor do que o processo aeróbio (CAMPOS, 1994). Além disso, conforme o tipo de tratamento empregado, diversos tipos de lodo são produzidos, em diferentes intervalos de tempo.

Os problemas operacionais relacionados à rede coletora normalmente estão associados à variação na vazão, podendo o sistema operar acima de sua capacidade, dispensando etapa posterior de estabilização, uma vez que o lodo sai do sistema em boas condições de estabilidade (SANEPAR, 2002).

## **2.4 SISTEMA DE SECAGEM**

Os leitos de secagem desidratam e secam o lodo combinando processos de percolação e evaporação natural do excesso de água. O produto final removido dos leitos apresenta teor de sólido de 40 a 70%, variando em função do clima e período de secagem. Os leitos constituem excelente opção

para desidratação do lodo em condições de clima favorável. A condição de uso é que o resíduo seja bem estabilizado, pois só assim será facilmente drenável e não apresentará problemas de odores.

## 2.5 CALEAGEM

Caleagem é um método de estabilização e desinfecção química e térmica por meio da adição e mistura de cal ao lodo a altas dosagens, para alcalinização brusca do meio, elevando o pH a níveis ligeiramente superiores a 12 por algumas horas após o processo, o que inativa ou destrói a maior parte dos patógenos presentes no lodo, com aumento da temperatura em função das reações químicas a cerca de 60°C durante o choque alcalino.

O método concorre também para a desidratação do lodo e é tido como alternativa simples e de custo relativamente baixo, além de atuar na estabilização química do lodo reduzindo muito o problema de odor. O processo aumenta a porosidade do produto final e o efeito residual da cal no solo é benéfico atuando como condicionador e elevando seu pH. O lodo de esgoto pode ser utilizado na agricultura depois de ser tratado com cal a uma proporção de 50% do valor da massa seca do resíduo (ANDREOLI & PEGORINI, 2000).

Uma alternativa tecnológica é a realização do processo de calagem do lodo ainda dentro dos leitos de secagem durante o processo de desidratação. Se os aspectos de engenharia dos leitos não se mostrarem proibitivos, a possibilidade é promissora como prática corrente em um sistema de gestão.

A calagem aumenta o teor de sólidos de lodos pastosos de 15% para 25 a 35%. No âmbito de projetos de pesquisa, alguns resultados preliminares podem apontar a eficiência do método, em condições de bancada, na eliminação de patógenos. A calagem não causa alterações relevantes na composição química do lodo, à exceção do notável incremento de Ca e Mg, em função do material de origem ser rico nos elementos, no caso de uso da cal dolomítica. Os aumentos médios nos teores de Ca e Mg são da ordem de 6,45 a 11,2 vezes o teor inicial, respectivamente.

No Brasil a calagem representa uma alternativa de solução interessante. Observando-se os resultados de caracterização sanitária, após calagem e compostagem, em estudos realizados pelo Programa Interdisciplinar para Reciclagem Agrícola de Lodo de Esgoto da SANEPAR constata-se a redução dos teores destes agentes nos lodos, com níveis de redução da ordem de 99,9% em relação ao teor original de cada patógeno testado. Os resultados demonstram a eficiência da calagem na remoção dos indicadores e mostram que os coliformes fecais têm maior resistência ao tratamento por calagem (SANEPAR, 2002).

Experimentos mais recentes realizados no Paraná demonstraram que o percentual de viabilidade dos ovos de helmintos encontrados no início da experiência, foi de 40% e chegou a 0% em 60 dias. Aos 90 dias confirmou-se o resultado anterior, ou seja, 100% de redução da viabilidade dos ovos (SANEPAR, 2002).

A retirada do lodo dos leitos de secagem é feita manualmente. Há três formas de se proceder a mistura na calagem: mistura manual, mistura com o uso de betoneira e com misturador-moedor.

## **2.6 LODO DE ESGOTO**

Lodo de esgoto (LE) é uma denominação genérica utilizada para caracterizar o resíduo sólido gerado pelos sistemas de tratamento de águas residuárias (SANEPAR, 1997). Trata-se de material heterogêneo, cuja composição depende do tipo de tratamento empregado para a purificação do esgoto e das características das fontes geradoras.

O lodo é o principal subproduto extraído das estações depuradoras (outros são areia e lixo), apresentando-se na forma de um barro putrescível constituído de 98% de água (SEWAGE, 1989).

Dos sólidos contidos no lodo, 70 a 80% se constituem em matérias orgânicas, incluindo óleos e graxas (SEWAGE, 1989), consideradas um valioso fertilizante orgânico, por conter nitrogênio, fósforo, pequenas quantidades de

potássio e elementos traços, os quais melhoram a estrutura e a fertilidade do solo (ANGLIAN, 1991).

O LE não deve ser considerado como um simples resíduo, porquanto suas características físico-químicas o tornam um excelente condicionador do solo. Assim, o LE passa a ser entendido como biossólido, ou seja, como o lodo resultante do tratamento biológico dos esgotos, condicionado de modo a permitir o seu manuseio de forma segura.

## **2.7 UTILIZAÇÃO INTERNACIONAL DO LODO DE ESGOTO**

Os governos de diversos países enfrentam grandes dilemas políticos para o descarte do lodo de esgoto em áreas rurais que podem equilibrar adequadamente o problema da poluição com os benefícios de nutrientes adicionais e materiais orgânicos. Governantes de muitos países reconhecem explicitamente as ameaças ao solo, ao ar e à água por metais pesados e outros contaminadores presentes no lodo de esgoto. Muitos procuram conter os riscos regulando a disposição do lodo de esgoto, impondo limites ao conteúdo de contaminadores no lodo, considerando o propósito de uso do lodo, limitando seu volume de uso, regulando a frequência de sua aplicação em solos agrícolas, estabelecendo limites máximos de sua aplicação e estudando seus contaminadores.

Na Europa e na América do Norte grandes quantidades de lodo de esgoto são descartadas em terras agrícolas, que são avaliadas como uma fonte de nutrientes e um condicionador de solo, tendo o cádmio como principal fator limitante ao seu uso.

Os Países Baixos têm grande preocupação com relação ao cádmio no meio ambiente e adotaram os seguintes princípios básicos, ao considerarem os usos do lodo de esgoto, quais sejam: a inserção do cádmio em terras aráveis (como fertilizantes e no lodo) deve estar equilibrada com relação à colheita e ao desmatamento e o nível do cádmio em sedimentos recém formados não deve exceder aos mesmos limites que são estabelecidos para o solo.



A maioria das províncias canadenses tem diretrizes limitando o conteúdo de cádmio do lodo de esgoto utilizado para aplicações agrícolas.

Pesquisa extensa realizada nos EUA, onde um considerável monitoramento de cádmio no solo é efetuado regularmente, demonstra que a aplicação do lodo de esgoto pode aumentar o conteúdo de materiais orgânicos no solo. (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1995) Sob as diretrizes da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), se o lodo é pasteurizado e estabilizado e tem concentrações de cádmio abaixo de 39 mg de Cd/kg, ele poderá ser utilizado para fins gerais com relação à terra.

A Austrália ainda não possui padrões nacionais de regulamentação em relação à utilização e disposição do lodo de esgoto na agricultura, emprestando de outros países normas para sua utilização. Atualmente o país está em processo de criação de normas nesse sentido, buscando métodos eficazes para a estabilização e utilização segura do lodo de esgoto.

## **2.8 A UTILIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO NO BRASIL**

No Brasil, não existe uma lei federal sobre a disposição final do resíduo LE no solo. O uso inadequado pode provocar sérios impactos ambientais, como a contaminação do solo e de recursos hídricos e a produção de alimentos contaminados por patógenos. Sem uma lei federal específica, o IBAMA e outros órgãos responsáveis pelo controle da poluição têm dificuldade na fiscalização da aplicação do lodo de esgoto, ficando impossibilitados de desenvolverem um monitoramento preciso de um possível impacto ambiental. Este monitoramento realiza-se, no Brasil, com base em leis e normas estaduais e em normas da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, a USEPA.

No estado de São Paulo, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), órgão vinculado à Secretaria do Meio Ambiente, estabeleceu, em 1999, normas provisórias estaduais (NT P4.230)

regulamentando o uso agrícola de lodos resultantes de tratamentos biológicos, incluindo o lodo de esgoto (biossólido).

Os limites indicados nesta norma são os mesmos adotados pela USEPA, nos EUA. Entretanto, as condições brasileiras são diferentes, o que pode resultar em erros na norma regulamentadora.

No Estado do Paraná, a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) elaborou um Manual Técnico, visando orientar os usuários de biossólidos, os operadores de estações de tratamento e os tomadores de decisão sobre os procedimentos de produção do lodo (SANEPAR, 1997).

A Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) fazia a distribuição do lodo de esgoto, mediante a garantia de que os usuários do resíduo respeitariam as normas sugeridas pela USEPA, pela NT P4.230.

## **2.9 O LODO DO ESGOTO NO ESTADO DO PARANÁ**

Em 22 de janeiro de 1999, o Paraná promulgou a Lei nº 12.493, estabelecendo os princípios e normas referentes à geração, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte e destinação final dos resíduos sólidos do estado, visando ao controle da poluição. Essa lei determina que os resíduos sejam tratados pela fonte geradora e enquadrados em termos definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP). A lei proíbe o lançamento do lodo de esgoto *in natura* e a céu aberto, a queima a céu aberto e o lançamento em corpos d'água, terrenos baldios, redes públicas, poços, redes de drenagem pluvial, redes de esgotos e redes de eletricidade e de telefonia.

A partir de 1993 iniciaram-se os estudos de caracterização do LE, para viabilizar a sua utilização na agricultura. Com o objetivo de gerar tecnologias e critérios seguros para o uso do LE como fertilizante, a SANEPAR desenvolveu um amplo programa multidisciplinar de pesquisa, no qual várias instituições foram envolvidas, entre elas: a Universidade Federal do Paraná, a Universidade Estadual de Londrina, o Instituto Agrônomo do Paraná, o

Instituto Ambiental do Paraná e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (SANEPAR, 1997). Segundo a SANEPAR (1997), no estado do Paraná são produzidos basicamente dois tipos de LE: o lodo anaeróbico e o aeróbio.

Em 20 de maio de 2008, foi inaugurada a unidade piloto de energia renovável da SANEPAR, na ETE Ouro Verde. Nesta ETE, o biogás gerado no tratamento doméstico de mais de 17.550 pessoas é convertido em energia elétrica utilizada no próprio sistema de tratamento (WEBER, 2008).

## **2.10 O LODO DO ESGOTO EM FOZ DO IGUAÇU**

A produção atual de lodo no município de Foz do Iguaçu se concentra nas estações: ETE Europa, ETE Ouro Verde, ETE Beira Rio, ETE Jupira e ETE late Clube. O processo de tratamento empregado na ETE Ouro Verde é o sistema anaeróbio realizado em reatores do tipo RALF e objeto deste estudo.

## **2.11 CONDICIONAMENTO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLO**

De acordo com NOGAMI & VILLIBOR (1995), o solo é um material natural não consolidado, isto é, constituído por grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos relativamente suaves. O uso de aditivos químicos em solos destinados à construção civil e agrícola tem como objetivo melhorar suas características mecânicas e seu comportamento sob a ação da água.

A prática da estabilização de solos é bastante antiga, havendo referências na literatura de que ela seja milenar e que tenha sido utilizada como recurso técnico na construção civil, ainda que em condições primitivas (GUIMARÃES, 1980; NÓBREGA, 1985). Sob o ponto de vista da engenharia de construções rurais, os solos podem desempenhar várias funções, ora como

bases de sustentação das obras (fundações), ora como materiais de construção para diferentes aplicações (pavimentos, barragens, aterros, tijolos, blocos, entre outros). Independentemente do uso, os solos devem apresentar certas propriedades físicas e mecânicas relacionadas à estabilidade volumétrica, resistência e durabilidade. Os solos argilosos, em geral, não apresentam essas propriedades, sendo uma das alternativas promover sua estabilização.

O termo estabilização do solo corresponde a qualquer processo, natural ou artificial, pelo qual um solo se torna mais resistente à deformação e ao deslocamento do que o solo original. Tais processos consistem em modificar as características do sistema solo-água-ar com a finalidade de se obter propriedades de longa duração compatíveis com uma aplicação particular (HOUBEN & GUILLAUD, 1994).

Dentre os inúmeros métodos de estabilização de solos, para fins construtivos, o que tem sido identificado como mais prático e eficiente é o da estabilização química. De acordo com FANG (2008), esse método se refere aos que, tanto as interações químicas quanto as físico-químicas e físicas, podem ocorrer no processo de estabilização. A estabilização química inclui, também, os métodos em que são adicionados compostos ao solo com o objetivo de estabilizá-lo. Podem ser citadas, dentre as técnicas de estabilização, a do solo-cimento, a do solo-cal, a do solo-betume, a do solo-resina, a estabilização com cinzas volantes (*fly ash*) e escórias de alto forno (*blast furnace slag*), a estabilização com a utilização de sais (cloretos), ácidos (ácido fosfórico), lignina, silicatos de sódio (*water glass*), aluminatos de cálcio, sulfatos de potássio, óxidos de ferro, cinzas pozolânicas de turfas e restos de atividade agrícola como, por exemplo, palha de arroz e casca de amendoim, entre outros.

## **2.12 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS**

### **2.12.1 Massa específica**

A massa específica corresponde à relação entre a massa e o volume de determinado corpo e é medida em  $\text{kN.m}^{-3}$ . A densidade de um corpo é a relação entre a massa específica do corpo e a da água nas condições do ensaio (é adimensional).

Os solos são sistemas trifásicos: ar, água e sólidos. A massa específica aparente se refere ao sistema completo. Quando este material é seco, obtém-se a massa específica aparente seca. O termo massa específica real se refere ao sistema sem água ou ar e corresponde à massa específica do grão.

### **2.12.2 Densidade aparente**

Define-se densidade aparente do solo como a razão entre a massa da parte sólida de um dado volume aparente do solo (volume ocupado pelas partículas mais o volume ocupado pelos poros) e a massa de igual volume de água. A densidade aparente depende da porosidade do solo e varia também com a textura e o teor do solo em matéria orgânica.

A densidade aparente do composto deste trabalho foi realizada adaptando-se o método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997) que determina a densidade aparente de solos indeformados utilizando um anel de aço (Kopecky) de bordas cortantes de volume conhecido. Este método não é recomendado para solos argilosos, mas a finalidade do ensaio neste trabalho foi a de se determinar a densidade aparente de composto solto (TFSE).

### **2.12.3 Granulometria**

A parte sólida dos solos é composta, de uma forma geral, por um grande número de partículas que possuem diferentes dimensões. A granulometria ou análise granulométrica dos solos é o processo que visa definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, a percentagem em massa que cada fração possui em relação à massa total da amostra em análise.

A análise granulométrica pode ser realizada por peneiramento, quando se têm solos granulares como as areias e os pedregulhos; por sedimentação, no caso de solos argilosos; ou, ainda, pela combinação de ambos os processos. Com a determinação da densidade de partículas dos compostos pelo método de análise por sedimentação (NBR 7181, ABNT, 1984b) se estabelece a relação entre o diâmetro da partícula e sua velocidade de sedimentação em um meio líquido de viscosidade e peso específico conhecido (VARGAS, 1977).

### **2.12.4 Desempenho Mecânico dos Compostos**

#### **2.12.4.1 Índice de compactação**

O índice de compactação é determinado lançando-se sobre o solo natural existente, geralmente em camadas sucessivas, um solo com uma granulometria adequada; em seguida, modifica-se sua umidade mediante dessecação ou adição de água e se lhe transmite energia de compactação pela aplicação de golpes ou pressão. Para isso, utilizam-se diversos tipos de máquinas, como, por exemplo, rolos lisos, pneumáticos, pé de carneiro, vibratórios, entre outros, em função do tipo de solo e, muitas vezes, de sua acessibilidade.

Com os ensaios obtêm-se as curvas de compactação para se determinar os parâmetros ótimos da compactação. A umidade que se busca, define-se como umidade ótima, e é por meio dela que se consegue a máxima densidade seca, para a energia de compactação dada. Igualmente se define como densidade seca máxima aquela que se obtém para a umidade ótima. É comprovado que, à medida que se aumenta a umidade compacta-se o solo, a densidade seca vai aumentando até chegar a um ponto de máximo, cuja umidade é ótima. A partir deste ponto, qualquer aumento de umidade não supõe maior densidade seca, ocorrendo, ao contrário, uma diminuição desta. (VARGAS, 1977)

#### **2.12.4.2Índice de retração**

O índice de retração é determinado pela adaptação do antigo teste da caixa (PITTA, 1983). O composto passante pela peneira de 4 mm é umedecido até alcançar plasticidade suficiente para ser trabalhado no enchimento da caixa. As dimensões da caixa de retração utilizada foram 3 x 15 x 45 cm.

#### **2.12.4.3Resistência ao cisalhamento na compressão triaxial**

Segundo DAS (2007), a resistência ao cisalhamento de uma massa de solo é a resistência interna por área unitária que a massa de solo pode oferecer para resistir às rupturas e aos deslizamentos, ao longo de qualquer plano no seu interior. A compreensão da natureza da resistência ao cisalhamento possibilitará a análise dos problemas de estabilidade do solo, tais como: capacidade de carga, estabilidade de taludes e pressão lateral em estruturas de contenção de terra.

Ainda de acordo com o mesmo autor, Christian Otto Mohr apresentou a teoria para ruptura em materiais, afirmando que um material se rompe devido à combinação da tensão normal e de cisalhamento e não da máxima tensão normal ou de cisalhamento isoladas. Portanto, a relação funcional entre a

tensão normal e a tensão de cisalhamento em um plano de ruptura pode ser expressa pela equação (1):

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (1)$$

A envoltória de ruptura definida pela equação 1 é uma linha curva. Para a maioria dos problemas de mecânica dos solos, é suficiente aproximar a tensão de cisalhamento no plano de ruptura para uma função linear da tensão normal (Coulomb); tal função pode ser escrita pela equação 2:

$$\tau_f = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (2)$$

Em que:

$c$  = coesão;

$\varphi$  = ângulo de atrito interno;

$\sigma$  = tensão normal no plano de ruptura;

$\tau_f$  = resistência ao cisalhamento.

Esta equação é denominada de critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Em um solo saturado, a tensão normal total em um ponto é a soma da tensão efetiva ( $\sigma'$ ) e a poropressão ( $u$ ) ou (3):

$$\sigma = \sigma' + u \quad (3)$$

A tensão efetiva  $\sigma'$  é suportada pelos sólidos do solo. O critério de ruptura de Mohr-Coulomb, expresso em termos de pressão efetiva, é definido pela equação 4:

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \operatorname{tg} \varphi' \quad (4)$$

em que  $c'$  equivale à coesão e  $\varphi'$  ao ângulo de atrito com base na tensão efetiva.

As equações acima descritas são expressões da resistência ao cisalhamento, com base na tensão total e na tensão efetiva. O valor de  $c'$  para



areia e silte inorgânico é 0; para argilas normalmente adensadas,  $c'$  pode ser aproximadamente 0. Argilas sobreadensadas têm valores de  $c'$  maiores que 0. O ângulo de atrito  $\phi'$  é, às vezes, chamado de ângulo de atrito drenado. Os valores típicos de  $\phi'$  para alguns solos granulares são dados pela Tabela 1.

**Tabela 1 -** Valores típicos do ângulo de atrito drenado para areias e siltes

<b>Tipos de solo</b>	<b><math>\phi'</math> (em graus)</b>
Areia: grãos arredondados	
Fofa	27-30
Média	30-35
Compacta	35-38
Areia: grãos angulares	
Fofa	30-35
Média	35-40
Compacta	40-45
Pedregulho com alguma areia	34-48
Silte	26-35

Fonte: DAS (2007).

O ensaio de compressão foi utilizado para determinar esta combinação pela aplicação de um carregamento axial sobre um corpo-de-prova cilíndrico do solo.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO EXPERIMENTO**

O experimento foi conduzido no Laboratório de Geotecnia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), *campus* de Cascavel e no Laboratório de Concreto e Mecânica dos Solos da União Dinâmica de Faculdades Cataratas (UDC), na cidade de Foz do Iguaçu, no período de fevereiro de 2007 a maio de 2008.

#### **3.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO (LODO DE ESGOTO)**

##### **3.2.1 Caracterização do lodo de esgoto caleadado**

O lodo de esgoto é um resíduo sólido gerado durante o tratamento de águas residuárias nas estações de tratamento de esgotos. Após o tratamento a matéria sólida é separada da água residuária e seca, obtendo-se o lodo de esgoto *in natura*.

O tratamento e a disposição final do lodo de esgoto constituem um problema complexo, face ao grande volume gerado, à dificuldade em se encontrar locais adequados e seguros para seu armazenamento, aos impactos ambientais, aos custos e às características de operação e processo. Portanto, qualquer decisão sobre o destino final mais apropriado para este resíduo depende de sua caracterização, avaliação e minimização dos riscos de contaminação ao meio ambiente e ao homem (BERTON, 2000). É por essa

razão que, após a secagem, esse material é triturado e misturado com cal virgem, porquanto, de acordo com ANDREOLI, HOPPEN & MÄDER NETTO, (2001), sanitariamente é ideal que o lodo fique no mínimo por 72 horas com o pH superior a 12. O produto da mistura do lodo de esgoto com a cal é denominado lodo de esgoto caleado.

Durante o estudo do lodo de esgoto caleado, foi observado, no histórico de ensaios realizados pela SANEPAR de Foz do Iguaçu, que o teor de matéria orgânica alcançava em média, aproximadamente, 26%, sendo que, no último lote do ano de 2006, a matéria orgânica alcançou, aproximadamente, 32%. Na Tabela 2 são apresentadas as características do lodo utilizado.

**Tabela 2 -** Características do lodo de esgoto caleado em estudos realizados a pedido da SANEPAR, com amostras coletadas no ano 2007 (limites permitidos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 380/2006)

Determinação	Extrator/Digestor	Técnica analítica	Resultado	Unidade
(MS) Matéria Seca	Sem Extrator	Gravimetria	76,20	%
(pH) Potencial hidrogeniônico	Sem Extrator	Potenciometria	12,14	
(RM) Resíduo Mineral	Sem Extrator	Calcinação	66,90	%
(N) Nitrogênio	Dumas	Combustão	1,61	%
(P2O5) – Pentóxido de Fósforo Total	Ácido Clorídrico	Colorimetria	0,78	%
(K2O) Óxido de Potássio	Ácido Nítrico-Clorídrico	Espectrofotometria de A.A	611,92	mg/kg
(CaO) Óxido de Cálcio	Ácido Nítrico-Clorídrico	Espectrofotometria de A.A	16,83	%
(MgO) Óxido de Magnésio	Ácido Nítrico-Clorídrico	Espectrofotometria de A.A	0,16	%
(Carb) Carbono	Sem Extrator	Calcinação	18,75	%
(C/N) Relação C/N	Sem Extrator	Cálculo	11,67	

Parâmetros	Unidades	L.D.	L.Q.	BRANCO	02130CS001
Cádmio	(mg/kg)	0,25	0,50	N.D.	0,46
Chumbo	(mg/kg)	0,10	0,50	N.D.	30,69
Cobre	(mg/kg)	0,10	0,50	N.D.	165,93
Cromo	(mg/kg)	0,25	0,50	N.D.	31,39
Mercúrio	(mg/kg)	0,04	0,10	N.D.	0,66
Níquel	(mg/kg)	0,25	0,50	N.D.	11,57
Zinco	(mg/kg)	0,25	0,50	N.D.	72,12

Dados das Amostras	
Fator de Diluição	1
Umidade (%)	N.A.

Observações:  
L.D. – Limite de Detecção do método. N.D. – Não detectado Acima do Limite de Detecção.  
L.Q. – Limite de Quantificação do método. N.A. – Não Aplicável.

Fonte: Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária (2007) e Laboratório *Analytical Solutions* (2007).<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laudo emitido pelo Laboratório *Analytical Solutions* por solicitação da SANEPAR.

Com a preocupação de se manter um baixo teor de matéria orgânica no solo, foram realizados ensaios de qualificação do lodo de esgoto caleado. O ensaio foi realizado de acordo com o que estabelece a NBR 13600 (ABNT, 1996) para determinar o teor de matéria orgânica através da diferença de massa encontrada entre a amostra de solo seca e a amostra de solo seca, após queima a 440 °C por um período de 24 horas. Pela NBR 13600 determina-se o teor de matéria orgânica em solos. Como a finalidade do lodo de esgoto é o uso em solos para sua estabilização, pode-se considerar o lodo de esgoto caleado nesse estudo como parte constituinte do solo. É possível, portanto, utilizar a NBR 13600 como fundamento para a determinação do teor de matéria orgânica no lodo de esgoto caleado como parte constituinte do solo.

O ensaio realizado como qualificação do lodo de esgoto caleado demonstrou que o resíduo não tinha condições de uso para estabilização de solos, porque o teor de matéria orgânica alcançou, em média, 34,3%, conforme se verifica na Tabela 3.

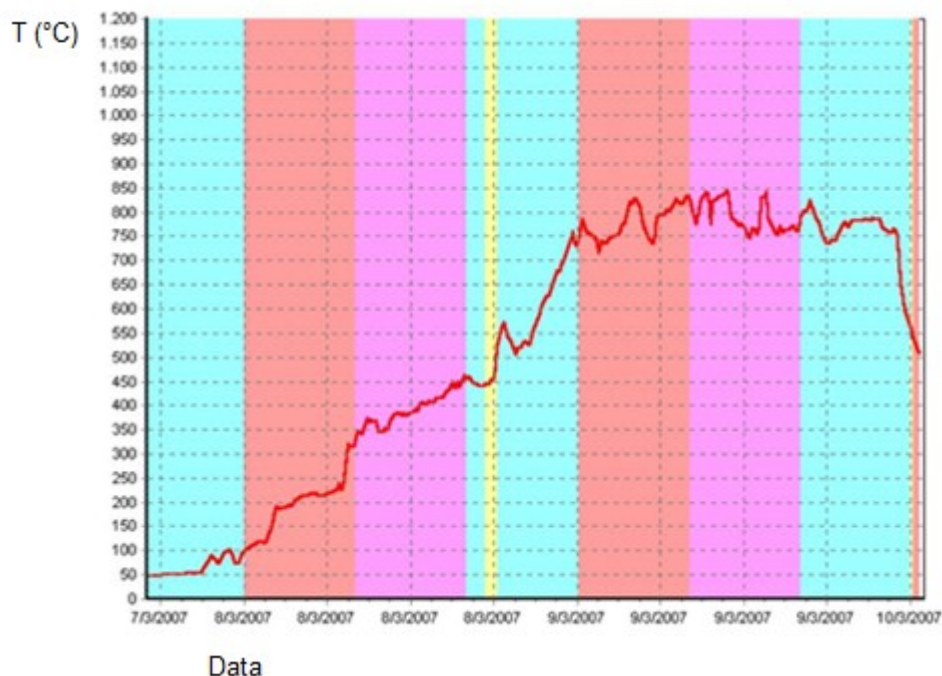
**Tabela 3** - Teor de matéria orgânica em lodo caleado, de acordo com o ensaio realizado em laboratório, conforme a NBR 13600 (ABNT, 1996)

Teor de matéria orgânica em lodo caleado					
Amostra		A (g) (valores antes da estufa)	B (g) (valores após 24 horas de estufa)	M.O. (%) (matéria orgânica)	M.O.médio
Solo	1	42,83	39,22	8,4	6,6%
	2	42,89	40,85	4,8	
Lodo de esgoto caleado	a	40,9	26,86	34,3	34,3%
	b	35,87	23,57	34,3	

Após o ensaio de qualificação foi determinado, a partir dos resultados, que o lodo de esgoto caleado liberaria ao solo um teor de matéria orgânica muito elevado para a finalidade deste trabalho, sendo necessária a redução desse teor. Como procedimento de redução do teor de matéria orgânica, foi escolhida a calcinação do lodo de esgoto caleado.

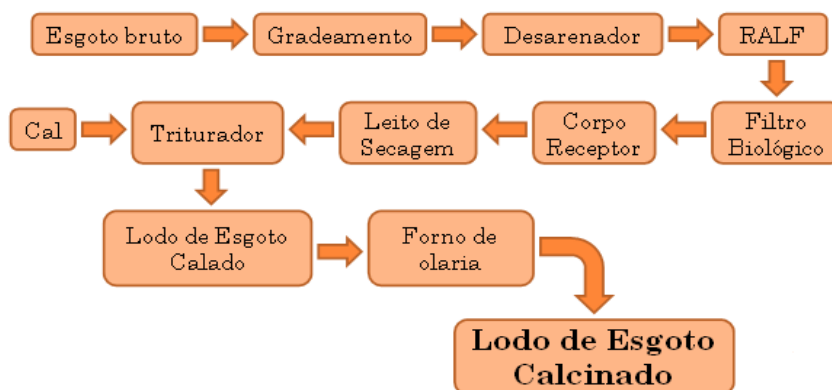
Os principais motivos da escolha da calcinação foram: a grande quantidade de olarias na Região Oeste do Paraná, a facilidade de acesso aos proprietários das olarias, o baixo custo da calcinação, a confiabilidade do processo na remoção da matéria orgânica e a simplicidade na execução de tal

processo. A calcinação foi atingida por meio da queima do lodo de esgoto caleado em fornos de olaria com temperatura média de queima em torno de 750°C, por um período mínimo de 24 horas, conforme demonstra a Figura 5.



**Figura 5** - Gráfico da queima do lodo de esgoto (processo de calcinação).

A espessura máxima de lodo de esgoto caleado dentro do recipiente de queima foi determinada, empiricamente, em 15 cm, alcançando, assim, uma queima uniforme em toda a amostra. Após o processo de calcinação, obteve-se um produto de baixo teor de matéria orgânica que foi denominado como lodo de esgoto calcinado, representado pelo processo esquematicamente mostrado na Figura 6.



**Figura 6** - Esquema do processo de produção do lodo de esgoto calcinado.

Por apresentar um baixo teor de matéria orgânica (4,37%), o lodo de esgoto calcinado foi escolhido como aditivo para estabilização de solos neste trabalho.

### 3.2.2 Caracterização do lodo de esgoto calcinado

Segundo os laudos técnicos da empresa Solução Ambiental Análise e Consultoria Limitada, da cidade de São Carlos, no estado de São Paulo, é possível observar, nas Tabelas 4 e 5, tanto os parâmetros agronômicos quanto os parâmetros de metais pesados.

**Tabela 4 -** Laudo técnico de parâmetros agronômicos

Parâmetro Analítico: Potencial Agronômico			
Parâmetro Analítico	Resultado Analítico	Unidade	Método Analítico
Ca total	<b>20,15</b>	g CaO/100 g Sólidos Totais	SM3030H SM 3500 Ca B/C
Mg	<b>0,70</b>	q MgO/100 g ST	SM 3500
K	<b>0,05</b>	g K <sub>2</sub> O /100 g Sólidos Totais	SM3030H SM 3500
P total	<b>0,04</b>	g P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / 100 g Sólidos Totais	SM 3030H SM 4500P
C total	<b>0,55</b>	g C /100 g Sólidos Totais	SM 5220
N total	<b>0,06</b>	g N / 100 g Sólidos Totais	SM 4500
C/N	<b>9,17</b>	<i>Adimensional</i>	SM 5220 SM 4500
PH	<b>12,45</b>	<i>Adimensional</i>	SM 4500
Matéria Orgânica	<b>4,37</b>	g MO / 100 g Sólidos Totais	SM 2540G
Soados Totais	<b>99,46</b>	g/100 g	SM2540G

Fonte: Solução Ambiental Análise e Consultoria Ltda. (2007).

**Tabela 5 -** Laudo técnico de parâmetros de metais pesados

<b>Parâmetro Analítico: Metais Pesados</b>					
<b>Parâmetro Analítico</b>	<b>Valor Observado</b>	<b>Valor Máximo Permitido (VMP)</b>	<b>Limite de Detecção</b>	<b>Unidade</b>	<b>Método Analítico</b>
Cd	<b>&lt; LD</b>	20,0	0,0100	mg/kg de Sólidos Totais	US-EPA:SW 846 M. 3050B
Cu	<b>255,0</b>	1000,0	0,0160	mg/kg de Sólidos Totais	US-EPA:SW 846 M. 3050B
Cr	<b>63,0</b>	1000,0	0,0750	mg/kg de Sólidos Totais	US-EPA:SW 846 M. 3050B
Ni	<b>37,0</b>	300,0	0,0089	mg/kg de Sólidos Totais	US-EPA:SW 846 M. 3050B
Pb	<b>96,0</b>	750,0	0,0397	mg/kg de Sólidos Totais	US-EPA:SW 846 M. 3050B
Hg	<b>&lt; LO</b>	16,0	$1,47 \times 10^{-5}$	mg/kg de Sólidos Totais	US-EPA:SW 846 M. 3050B
Zn	<b>186,0</b>	2500,0	0,0017	mg/kg de Sólidos Totais	US-EPA:SW 846 M. 3050B

Fonte: Solução Ambiental e Consultoria Ltda. (2007).<sup>2</sup>

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O solo utilizado na pesquisa é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico, com textura argilosa (EMBRAPA, 1997), de larga ocorrência na Região Oeste do Paraná.

A amostra do solo foi coletada de um sítio com solo virgem, localizado no bairro do Morumbi (25°31'S 54°32'W elev. 232 m), zona leste da cidade de Foz do Iguaçu, a uma profundidade de 40 cm da superfície.

Conforme a análise granulométrica, o solo da área do experimento possui 21% de areia, 19% de silte e 60% de argila, considerado um solo com textura argilosa, portanto.

<sup>2</sup> Laudo emitido pelo Laboratório Solução Ambiental e Consultoria Ltda. por solicitação da SANEPAR.

### **3.4 COLETA DAS AMOSTRAS UTILIZADAS**

#### **3.4.1 Coleta das amostras de solo**

A coleta das amostras deformadas foi realizada com o uso de pá, picareta e enxada, tomando-se em sacos plásticos porções de 30 kg de solo.

As amostras foram encaminhadas ao laboratório, onde foram colocadas para secar à sombra, para então serem destorroadas e passadas na peneira nº. 10 (ABNT), com abertura de malha 2,00 mm, obtendo-se terra fina seca ao ar (TFSA). As amostras de solo foram coletadas de acordo com o Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (1997) e preparadas conforme a NBR 6457 (ABNT, 1986a).

#### **3.4.2 Coleta das amostras de lodo de esgoto caledado**

O lodo foi coletado nos leitos de secagem dos tanques da Estação de Tratamento de Esgoto Ouro Verde, da cidade de Foz do Iguaçu, com o auxílio de pá, tomando-se o conteúdo em sacos plásticos. As amostras foram retiradas aleatoriamente do topo, meio e base da pilha. Para a realização dos ensaios as amostras foram recolhidas em conformidade com a NBR 10007 (ABNT, 2004b).

#### **3.4.3 Dosagem dos compostos**

O composto de lodo de esgoto e solo foi elaborado nas proporções de 0, 8, 17,5, 28,5 e 43%, em massa de lodo de esgoto seco/solo seco, definidas para cobrir toda a faixa de impacto provocado pelo lodo de esgoto calcinado no comportamento do solo. As porcentagens foram experimentais em razão do



ineditismo de tal compósito. As proporções a serem ensaiadas estão relacionadas na Tabela 6.

**Tabela 6 -** Dosagem do compósito em massa (%)

<b>Dosagem dos compostos em massa (%)</b>		
<b>Composto seco</b>	<b>Lodo de esgoto calcinado</b>	<b>Solo seco</b>
T0	0%	100,0%
T1	8%	92,0%
T2	17,5%	82,5%
T3	28,5%	74,5%
T4	43,0%	57,0%
T5	100,0%	0%

Os compostos T0 e T5 descritos na Tabela 6 são, respectivamente, o solo testemunha e o lodo de esgoto calcinado para ensaio de caracterização.

A produção dos compostos foi feita individualmente, sendo a mistura realizada nas devidas proporções para se obter a quantidade necessária para cada ensaio, momentos antes de sua realização.

Os compostos foram ensaiados em de duas baterias: ensaios de características físicas e ensaios de desempenho mecânico. Os ensaios de características físicas foram: granulometria, massa específica e densidade aparente. Os ensaios de desempenho mecânico foram: índice de compactação, índice de retração e resistência ao cisalhamento na compressão triaxial.

### **3.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS**

#### **3.5.1 Massa específica**

O método de determinação da massa específica dos compostos seguiu as instruções apresentadas na NBR 6508 (ABNT, 1984a), em que,

aproximadamente, 100 g de composto seco ao ar, destorroado e passante pela peneira com abertura de 4,8 mm é hidratado por 12 horas. Depois de hidratado, o composto foi dispersado e transferido para um picnômetro de 1000 mL, no qual o ar aderente às partículas foi retirado por vácuo e banho-maria, e foi pesado o conjunto para determinação da massa específica.

### 3.5.2 Densidade aparente

Determinou-se a densidade, obtendo-se o volume de um anel metálico, completado com o composto lançado a menos de 10 cm de altura e nivelado com as bordas do anel. Após a determinação da massa do anel completo com composto, subtraiu-se a massa do anel para se obter a massa de composto no determinado volume já conhecido do anel. Calculou-se a densidade aparente de composto fino solto seco em estufa pela equação 5:

$$\delta_{ap} = \frac{M_{cc} - M_{anel}}{V_{anel}} \quad (5)$$

### 3.5.3 Granulometria

A curva de distribuição granulométrica dos tamanhos das partículas do composto foi obtida por análise granulométrica conjunta (tamização e sedimentação com leituras densimétricas), conforme estabelecido na NBR 7181 (ABNT, 1984b).

De acordo com CAPUTO (2006), as frações constituintes de solo segundo a escala granulométrica brasileira da ABNT obedecem aos valores mostrados na Tabela 7.

**Tabela 7 -** Frações constituintes de solo segundo a escala granulométrica brasileira

Fração de solo	Diâmetro do grão (mm)
Pedregulho	76 a 4,8
Areia	4,8 a 0,05
Silte	0,05 a 0,002
Argila	< 0,002

Fonte: CAPUTO (2006).

### 3.6 DESEMPENHO MECÂNICO DOS COMPOSTOS

#### 3.6.1 Índice de compactação

O ensaio para determinação do índice de compactação se resume ao ensaio de Proctor, conforme mostrado na Figura 7, em que se utiliza a curva de compactação e a umidade ótima para determinar a máxima densidade aparente do composto. O ensaio de compactação Proctor foi realizado de acordo com as normas estabelecidas pela NBR 7182 (ABNT, 1986b), consistindo em compactar cada uma das amostras de solo em um cilindro metálico de volume igual a 1000 cm<sup>3</sup>, em três camadas, cada uma com 25 golpes, com um peso de 2500 g precipitado a uma altura de 0,30 m. Após a compactação procedeu-se ao arrasamento e foi registrada a massa de solo para cálculo da densidade. Também foram retiradas três porções pequenas de solo para determinação da umidade média, pela diferença do material úmido e seco em estufa a 105° por 24 horas. Esse processo foi repetido para todas as amostras, com teores de umidade entre 24 a 36%, formando, assim, pares de valores de densidade e umidade com os quais se pode traçar a curva de compactação, conforme a padronização do ensaio normal de compactação de VARGAS (1977).



**Figura 7 -** Extração do corpo-de-prova do ensaio de Proctor.

### **3.6.2 Índice de retração**

A caixa de retração, exibida na Figura 8, foi moldada com as paredes untadas com óleo. Após a moldagem, a caixa foi posta à sombra para secagem por 96 horas. Com o corpo-de-prova seco, mediram-se os espaços entre o corpo-de-prova e as paredes da caixa, somando os dois lados e as aberturas das fissuras.



**Figura 8** - Foto ilustrativa do teste da caixa, utilizado para determinação do índice de retração.

As medidas foram realizadas em três pontos da seção transversal do corpo-de-prova, obtendo-se a média. O índice de retração foi calculado conforme a equação 6.

$$I_r = \frac{(L_i - L_f)}{L_i} \times 100 \quad (6)$$

### 3.6.3 Ensaio de compressão triaxial

O ensaio de compressão triaxial é feito utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos moldados a partir de determinadas amostras. A obtenção dos corpos-de-prova é feita no ensaio denominado mini MCV (*Moisture Condition Value*), é um dos ensaios empregados pela Metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical), desenvolvida por Nogami e Villibor na década de 80 com base no método proposto por Parsons em 1976, sendo de uso específico para solos compactados tropicais.

O teste de compactação, neste trabalho o ensaio de Proctor, é um dos principais ensaios da Metodologia MCT, pois, a partir de seus parâmetros básicos (teor de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima) moldam-se corpos-de-prova para determinação de outras propriedades geotécnicas da Metodologia MCT. Nas Figuras 9, 10 e 11 estão ilustrados os procedimentos para confecção dos corpos de prova e montagem do ensaio de compressão triaxial.

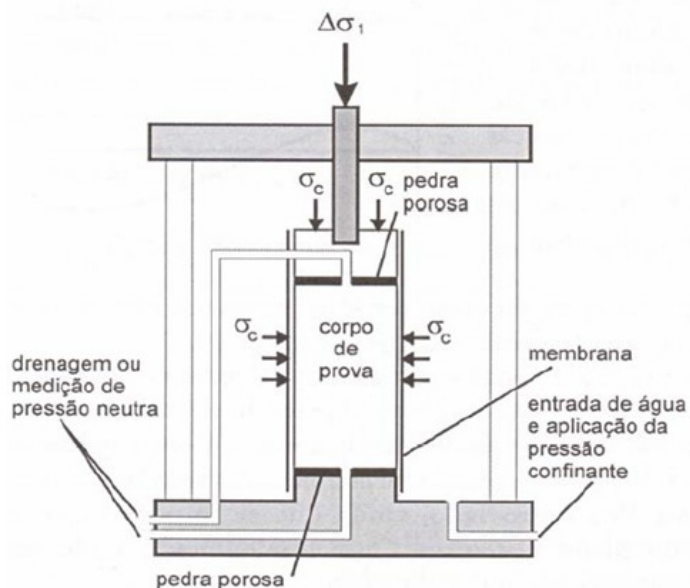
APARELHAGEM	CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES DOS RESULTADOS												
 <p>RELÓGIO COMPARADOR</p> <p>SOQUETE</p> <p>MOLDE</p> <p>PÉ DO SOQUETE</p> <p>CORPO DE PROVA</p> <p>BASE</p>	<p><b>COMPACTADOR:</b> Soquete do pé, com área igual do molde e com dispositivo que mede a altura do corpo de prova após qualquer número de golpes do soquete. Distinguem-se:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>TIPO E SIGLA</th> <th>MOLDE Ø (mm)</th> <th>MASSA SOQUETE (g)</th> <th>ALTURA DE QUEDA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Mini ou M</td> <td>50</td> <td>2270,4500</td> <td>305 mm</td> </tr> <tr> <td>SubMini ou S</td> <td>26</td> <td>1000</td> <td>200 mm</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>PROCEDIMENTOS:</b>  - MINI-PROCTOR: Umidade variável, energia constante (normal, in'ormedi'ória ou modificada).  - MINI-MCV: Umidade e energia variáveis, massa úmida constante (200 g no MINI, 30 g no SUB-MINI); obtém-se uma família de curvas de compactação.</p>	TIPO E SIGLA	MOLDE Ø (mm)	MASSA SOQUETE (g)	ALTURA DE QUEDA	Mini ou M	50	2270,4500	305 mm	SubMini ou S	26	1000	200 mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método de Ensaio NBR M 108/80 DER - M 181/83 DNER - ME 228/94</li> <li>- Preparo de corpos de prova para ensaios diversos.</li> <li>- Obtenção de dados para classificação MCT de solos.</li> <li>- Umidade ótima e massa específica aparente seca máxima para a energia de compactação escolhida</li> </ul>
TIPO E SIGLA	MOLDE Ø (mm)	MASSA SOQUETE (g)	ALTURA DE QUEDA											
Mini ou M	50	2270,4500	305 mm											
SubMini ou S	26	1000	200 mm											

**Figura 9 -** Ilustração do ensaio de compactação dos corpos-de-prova.

Fonte: FORTES (2008).



**Figura 10 -** Foto do mini MCV, aparelho utilizado para a moldagem dos corpos-de-prova de propriedade do DER (Departamento de Estradas e Rodagem).



**Figura 11** - Esquema de um aparelho de compressão triaxial.

Fonte: SOUZA PINTO (2000).

O corpo-de-prova é colocado na base da câmara de confinamento, com uma pedra porosa na sua base e outra no seu topo; em seguida, é colocada uma membrana impermeável envolvendo a amostra, que é presa por anéis de borracha, como mostrado na Figura 12.



**Figura 12** - Imagem da preparação do corpo-de-prova com uma pedra porosa em cada extremidade, antes da colocação da célula triaxial.

Fonte: FORTES (2008).

O corpo-de-prova é conectado no topo e na base para permitir a drenagem e depois conectado às buretas. Uma câmara de material resistente e transparente é fixada e cheia com água (Figura 13), cuja função é aplicar a tensão confinante ( $\sigma_3$ ) por meio do dispositivo para medição da pressão neutra e da água destilada aerada vinda do reservatório.

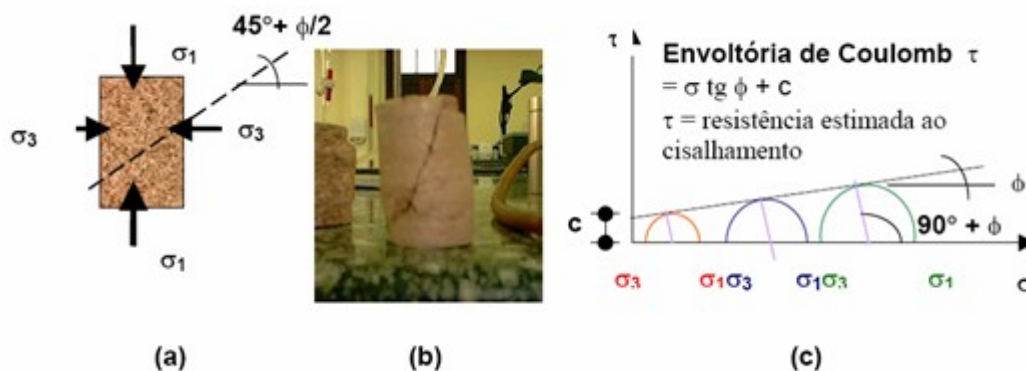


**Figura 13** - Célula de compressão triaxial de solo.

Durante o ensaio são aplicados carregamentos, medindo-se, em intervalos de tempo, o acréscimo de tensão axial que está atuando e a deformação vertical do corpo-de-prova. Esta deformação, dividida pela altura inicial da amostra, fornece a deformação vertical específica.

A ruptura é obtida com  $\sigma_1$  e os círculos de Mohr são traçados com os pares ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ) obtidos no ensaio e, em seguida, a envoltória de Coulomb, conforme mostrado na Figura 14.





**Figura 14** - (a) Aplicação da tensão principal  $\sigma_1$  e da tensão de confinamento  $\sigma_3$ ; (b) corpo-de-prova rompido; (c) Círculo de Mohr e envoltória de Coulomb.

Fonte: CERNICA (1995).

A força normal que é aplicada ao corpo-de-prova pelo pistão axial, dividida pela seção transversal do corpo-de-prova e somada a  $\sigma_3$  corresponde à pressão axial  $\sigma_1$ . A pressão neutra (poropressão) desenvolvida na água intersticial do corpo-de-prova é medida utilizando-se um aparelho capaz de medir pressões na água sem exigir variações de volume d'água intersticial da amostra.

O ensaio triaxial pode ser realizado de três formas:

a) ensaio não adensado e não drenado (UU – *unconsolidated undrained*) ou ensaio rápido (Q, de *quick*): este ensaio é recomendado quando se deseja obter a coesão e o ângulo de atrito de, por exemplo, um talude logo após a sua execução. Neste ensaio o corpo-de-prova é submetido à pressão confinante ( $\sigma_3$ ) e depois ao carregamento axial, sem se permitir a drenagem da água intersticial (sem conectar as buretas). O teor de umidade permanece constante e, no caso da amostra estar saturada, não ocorre variação de volume. Este ensaio demora de 1 a 2 horas;

b) ensaio adensado não drenado (CU – *consolidated undrained*) ou ensaio rápido pré-adensado (R): este ensaio é o que melhor representa as condições do solo para a análise da estabilidade de um aterro, certo tempo após a sua construção ou da estabilidade de uma barragem em virtude de um rebaixamento rápido do reservatório. Neste ensaio é aplicada a pressão confinante ( $\sigma_3$ ) e deixa-se dissipar a pressão neutra correspondente,

adensando o corpo-de-prova com  $\sigma_3$  (conectam-se as buretas para o pré-adensamento, demorando cerca de um dia para o adensamento). Na seqüência aplica-se o carregamento axial  $\sigma_1$ , espera-se estabilizar e se rompe sem drenagem. Este ensaio fornece a resistência não drenada em função da tensão de adensamento. Se as pressões neutras forem medidas, ter-se-á a resistência em termos de tensões efetivas, sendo, por essa razão, bastante utilizado, porque permite determinar a envoltória de resistência em termos de tensão efetiva em aproximadamente dois dias;

c) ensaio adensado drenado (CD – *consolidated drained*), também chamado de ensaio lento (S - *slow*), devido à condição de ser um ensaio muito moroso, levando, no caso das argilas, aproximadamente duas semanas para sua conclusão: Neste ensaio é permitida a drenagem do corpo-de-prova em todas as fases, sendo que, muitas vezes, ele chega ao laboratório já pré-adensado. Aplica-se a tensão confinante ( $\sigma_3$ ) e se espera que a amostra adense, ou seja, que a pressão neutra ( $u$ ) se dissipe. Aumenta-se, então, a tensão axial, de maneira a expulsar a água sob pressão, ocorrendo a dissipação total das pressões neutras durante todo o ensaio, ou seja, mantendo-se as pressões nulas durante todo o experimento, de modo que as pressões totais medidas sejam iguais às efetivas.

No trabalho em questão foi utilizado o método de ensaio adensado não drenado (CU – *consolidated undrained*), nas condições abaixo descritas.

### 3.6.3.1 Estados críticos em mecânica dos solos

O comportamento tensão-deformação foi determinado a partir dos parâmetros elásticos do solo, obtidos em ensaios triaxiais consolidados não drenados.

Das leituras obtidas no ensaio de cada corpo-de-prova foram elaboradas planilhas, utilizando-se o programa *Microsoft Excel*.

A tensão desvio  $q$  foi determinada por:

$$q = \frac{[(2,93686LA) + 0,928619] 100}{At} \quad (7)$$

$At$

Em que:

LA = refere-se à leitura no anel dinamométrico (mm);

At = área da seção transversal variável do corpo de prova (cm<sup>2</sup>);

A tensão axial ( $\sigma_1$ ) vem da adição da parcela anterior com a tensão confinante ( $\sigma_3$ ), conforme equação (8):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + q \quad (8)$$

Para a determinação do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) foi obtido o valor da deformação específica vertical (axial) do corpo de prova, pela equação (9):

$$\varepsilon_a = \Delta h / h_o \quad (9)$$

Em que:

$\Delta h$  = variação total da altura do corpo de prova;

$h_o$  = altura do corpo de prova indeformado.

Do mesmo modo foi obtida a deformação específica transversal (radial), do corpo de prova ( $\varepsilon_r$ ) pela equação (10):

$$\varepsilon_r = \Delta D / D_o \quad (10)$$

Com  $\Delta D$  representando a variação do diâmetro do corpo de prova e  $D_o$  o diâmetro do corpo de prova indeformado.

Desse modo, calculou-se o Coeficiente de Poisson pela equação (11):

$$\nu = \varepsilon_r / \varepsilon_a \quad (11)$$

Conhecida a deformação específica vertical axial ( $\varepsilon_a$ ) e os respectivos valores de tensão desvio ( $q$ ) foi traçado um gráfico de tensão versus deformação do qual, por meio do valor da tangente à curva na região de proporcionalidade, obteve-se o módulo de elasticidade longitudinal (E).

Pela tangente à curva tensão-deformação na região de proporcionalidade obteve-se o módulo de elasticidade longitudinal.

$$3D: p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad \begin{array}{l} \text{tensão octaédrica } p \\ \text{3Ax convencional} \end{array} \quad p = \frac{\sigma_a + 2\sigma_r}{3} \quad (12)$$

A tensão desvio  $q$  foi determinada por: tensões axiais:  $\sigma_1, \sigma_2$  e  $\sigma_3$ ,

$$3D: q = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (13)$$

$$3Ax \text{ Conv.: } q = \sigma_a - \sigma_r \quad (14)$$

Em que:

$\sigma_a$  = tensão axial;

$\sigma_r$  = tensão radial.

Obtiveram-se os invariantes de deformações pelas seguintes equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} 3D: \text{ deformação volumétrica: } \varepsilon_p = \varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ \text{deformação cisalhante: } \varepsilon_q = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2]^{1/2} \end{array} \right. \quad (15)$$

$$3Ax \text{ Conv.: } \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_p = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r \\ \varepsilon_q = \frac{2}{3}(\varepsilon_a - \varepsilon_r) \end{array} \right. \quad (16)$$

O Módulo de Elasticidade Transversal  $G$  foi determinado por:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (17)$$

Em que:

$E$  = Módulo de elasticidade longitudinal;

$\nu$  = Coeficiente de Poisson.

O Módulo de Deformação Volumétrica é dado por

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \begin{Bmatrix} \delta \varepsilon_p \\ \delta \varepsilon_q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/K & 0 \\ 0 & 1/3G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta p \\ \delta q \end{Bmatrix} \quad (18)$$

Em que a mudança de volume  $\delta \varepsilon_p$  está associada à variação de  $p(\delta p)$  e a mudança de forma  $\delta \varepsilon_q$  está associada à variação de  $q(\delta q)$

A Deformação Axial ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_a$ ), por sua vez, é obtida por

$$\delta \varepsilon_a = \frac{-\delta \ell}{\ell} \quad (19)$$

e a Deformação Radial ( $\varepsilon_3 = \varepsilon_2 = \varepsilon_r$ ) por:

$$\delta \varepsilon_r = \frac{-\frac{\delta r}{r} + \frac{\delta \ell}{\ell}}{2} \quad (20)$$

O Ensaio CU (*consolidated undrained*), método utilizado neste trabalho, conduz às seguintes equações:

$$\text{Volume constante: } V = \text{constante} \rightarrow \delta V = 0 \rightarrow V_f - V_o = 0 \rightarrow V_f = V_o \quad (21)$$

$$V_f = V_o$$

$V_o$  = Volume inicial do corpo-de-prova

$$A_f \cdot H_f = A_o \cdot H_o$$

$V_f$  = Volume final do corpo-de-prova

$$\pi R_f^2 \cdot H_f = \pi R_o^2 \cdot H_o$$

$$R_f^2 = \frac{R_o^2 \cdot H_o}{H_f} \quad H_f = H_o - \text{LVDT (Linear Variable Differential Transformer)}$$

$$R_f^2 = \frac{R_o^2 \cdot H_o}{H_o - \text{LVDT}}$$

$A_o$  = Área inicial da seção do corpo-de-prova

$$R_f = \sqrt{\frac{R_o^2 \cdot H_o}{H_o - LVDT}}$$

Af= Área final da seção do corpo-de-prova

$$R_f = R_o \sqrt{\frac{H_o}{H_o - LVDT}}$$

Ho= Altura inicial do corpo-de-prova

Hf= Altura final do corpo-de-prova

$$\varepsilon_r = \frac{dR}{R_o} = \frac{R_f - R_o}{R_o} = \frac{R_f}{R_o} - 1$$

Ro= Raio inicial do corpo-de-prova

$$\varepsilon_r = \frac{R_o}{R_o} \sqrt{\frac{H_o}{H_o - LVDT}} - 1$$

Rf= Raio final do corpo-de-prova

$$\varepsilon_r = \sqrt{\frac{H_o}{H_o - LVDT}} - 1$$

(22)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS COMPOSTOS

#### 4.1.1 Massa específica dos sólidos

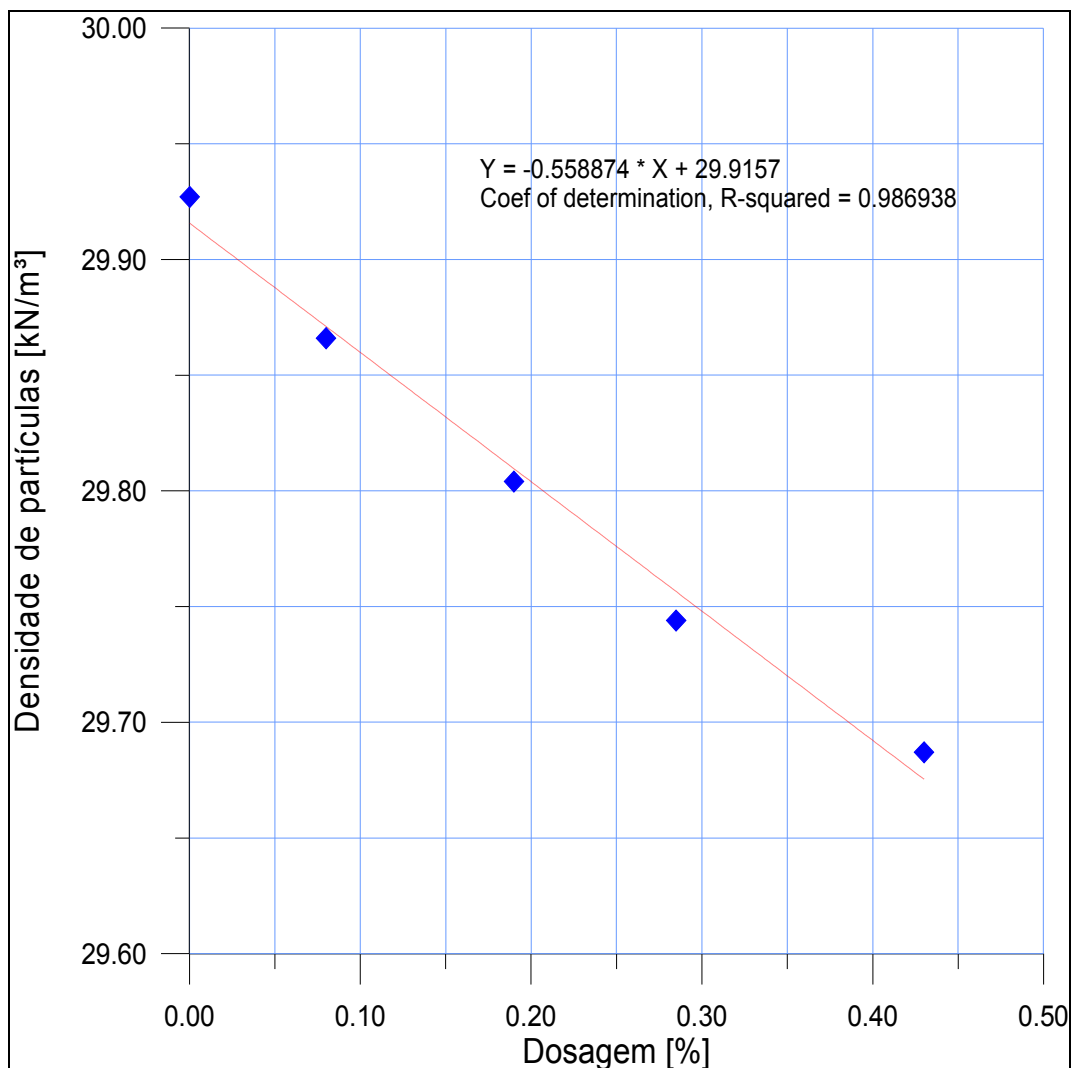
Conforme se verifica na Tabela 8, com a adição progressiva do lodo de esgoto calcinado (LEC) às amostras de solo, ocorreu redução da massa específica dos sólidos de cada composto do tratamento, em razão de a densidade do lodo de esgoto ser menor do que a do solo.

**Tabela 8** - Massa específica dos sólidos dos compostos

	T0	T1	T2	T3	T4	T5
Densidade ( $\text{kN.m}^{-3}$ )	29,927	29,866	29,804	29,744	29,683	29,128
Concentração (%)	0	0,081081	0,176471	0,290323	0,428571	1,0

Nos solos, o valor da densidade de partículas varia entre 23,0 e 29,0  $\text{kN.m}^{-3}$ . Seu valor médio, para efeitos de cálculo, é de 26,5  $\text{kN.m}^{-3}$  (KIEHL, 1985), porque os constituintes minerais predominantes nos solos são o quartzo, os feldspatos e os silicatos de alumínio coloidais, cujas densidades reais estão em torno de 26,5  $\text{kN.m}^{-3}$ .

Conforme pode ser observado no gráfico da Figura 15, o aumento do LEC nos compostos acarretou uma variação na densidade da partícula de 29,9  $\text{kN.m}^{-3}$  para 29,6  $\text{kN.m}^{-3}$ , permanecendo, portanto, com valor superior à densidade constante no Latossolo Roxo e também superior à variação normal de solos argilosos, que está entre os 23,0 a 29,0  $\text{kN.m}^{-3}$  (KIEHL, 1985).



**Figura 15** - Leitura da densidade da partícula dos compostos.

#### 4.1.2 Frações texturais dos compostos

Na Tabela 9 são mostradas as frações texturais dos compostos em função dos tratamentos. O gráfico da Figura 16 demonstra que, no tratamento T0 (solo testemunha), os compostos estão na proporção de 21% de areia, 19% de silte e 60% de argila. Com a adição progressiva do LEC, aumentaram as proporções de areia e silte e ocorreu a diminuição da porcentagem de argila,

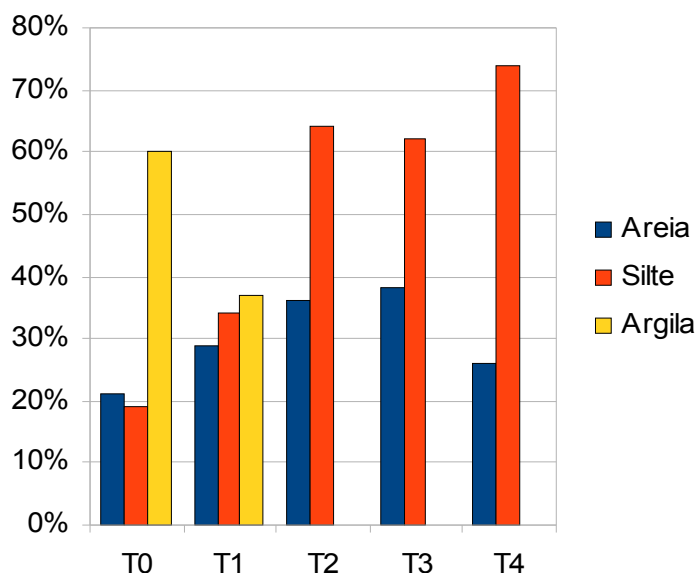


que, ao longo dos tratamentos, foi totalmente agregada, chegando a 0% nos tratamentos T2, T3 e T4.

GUIMARÃES (2001) explica que o cálcio, principal componente da cal, ataca quimicamente parte das argilas e até mesmo o próprio quartzo.

**Tabela 9** - Tabela comparativa granulométrica

Tratamento	Areia	Silte	Argila
T0	21%	19%	60%
T1	29%	34%	37%
T2	36%	64%	0%
T3	38%	62%	0%
T4	26%	74%	0%



**Figura 16** - Ilustração da tabela comparativa granulométrica.

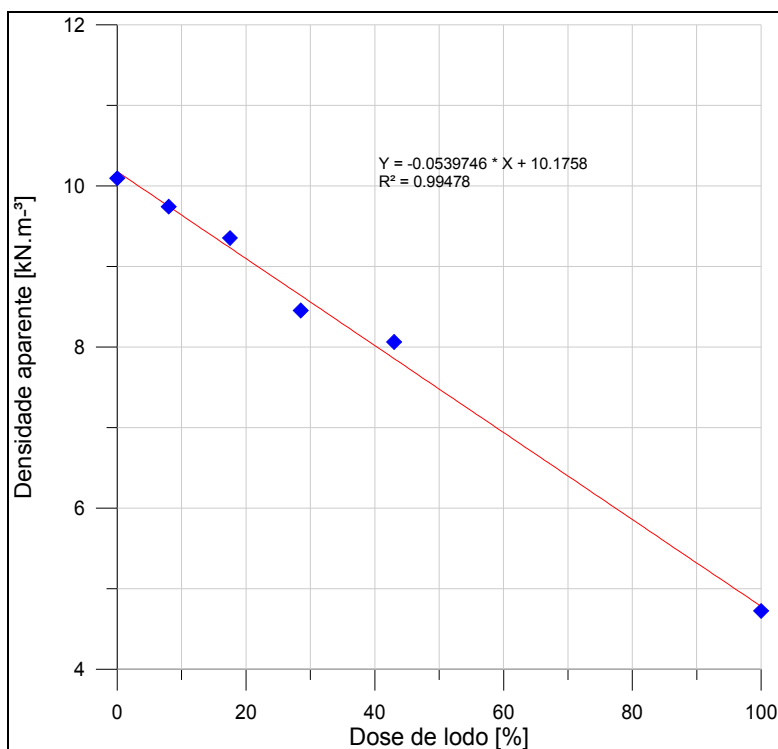
#### 4.1.3 Densidade aparente

Com a adição progressiva de LEC na amostra, o composto tem sua densidade aparente proporcionalmente reduzida de  $1 \text{ kN.m}^{-3}$  no tratamento T0 (testemunha) para  $0,80 \text{ kN.m}^{-3}$  no composto de tratamento T4.

Fica nítido que ocorreu uma redução da densidade aparente em função da adição de LEC nos tratamentos, como demonstra a Figura 17. Há uma tendência a se diminuir a densidade com adição do LEC, em função da diminuição de massa do material na mesma unidade de volume, devido ao fato do lodo possuir menor densidade do que o solo.

De acordo com os resultados apresentados por BOEIRA & SOUZA (2007, p. 585), em experimentos realizados com lodo de esgoto misturado com Latossolo entre os anos de 1999 e 2001, em Jaguariúna (SP),

[...] a densidade do solo [...] diminuiu significativamente com o aumento das doses [...] (de) lodo de esgoto. [...] a aplicação de compostos orgânicos freqüentemente aumenta o conteúdo de carbono do solo. O incremento deste conteúdo, geralmente, leva ao incremento da estabilidade de agregados, e da capacidade de retenção de água e, por outro lado, diminui a densidade do solo.

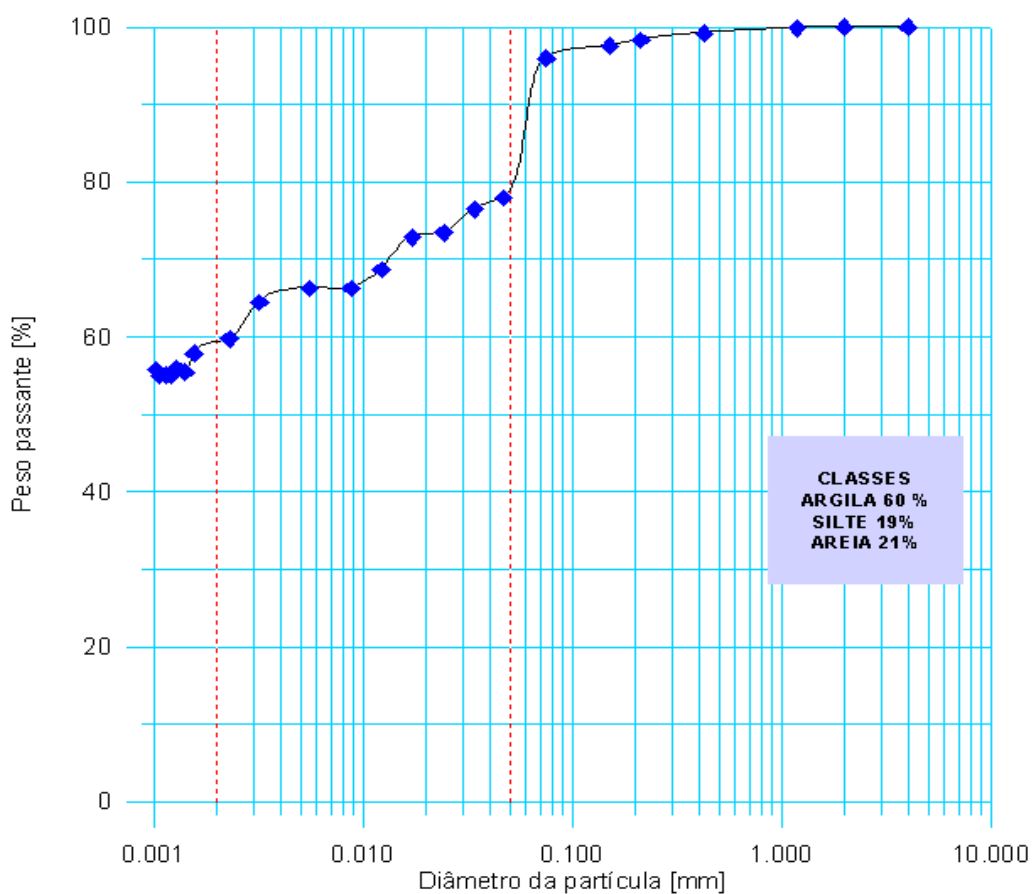


**Figura 17** - Gráfico demonstrativo da densidade aparente dos compostos.

#### 4.1.4 Curvas granulométricas dos compostos

##### 4.1.4.1 T0 (solo testemunha)

O solo puro, sem a presença de LEC, foi utilizado como testemunha e, segundo a forma de sua curva, é possível distinguir uma granulometria bem graduada (Figura 18), ou seja, larga faixa de tamanhos de grãos, com predominância de partículas finas, prevalecendo 60% de argila, 19% de silte e 21% de areia.

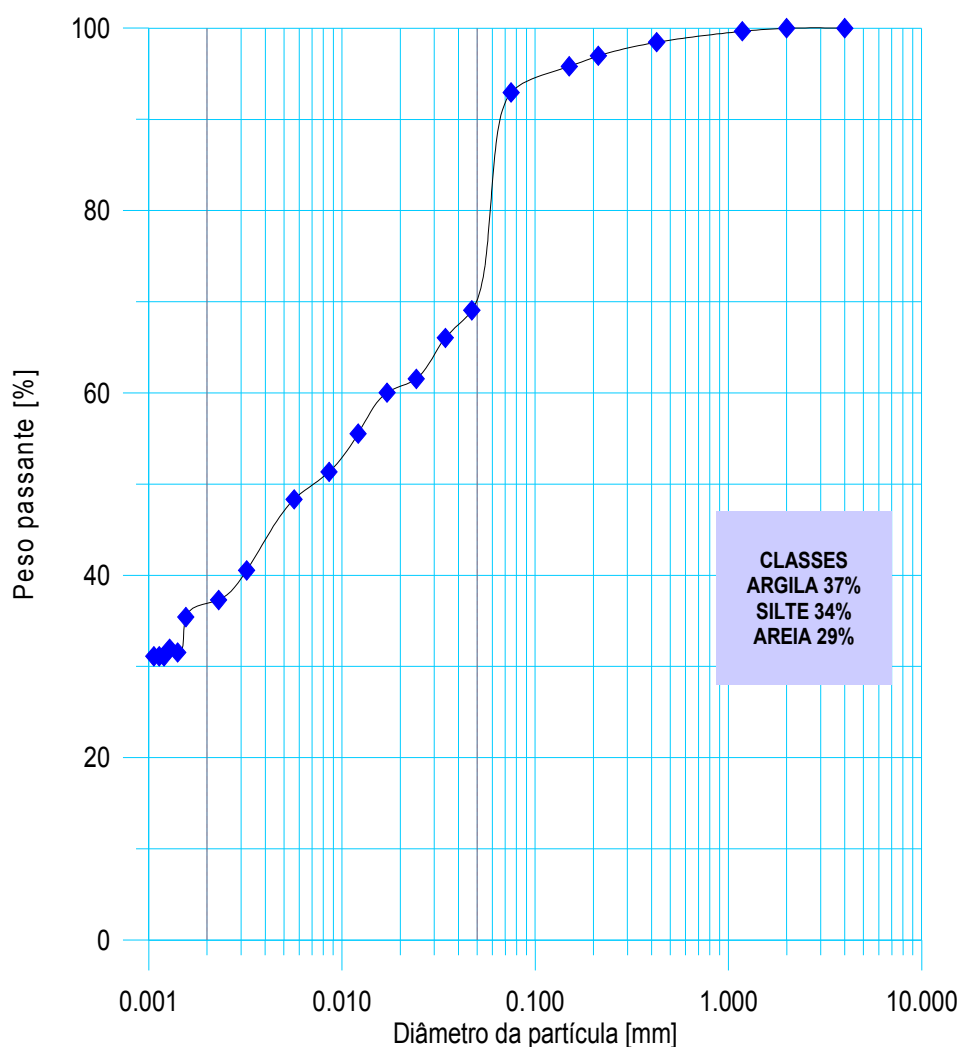


**Figura 18** - Curva granulométrica do tratamento T0.

## 4.1.4.2 T1 (solo com 8% de lodo de esgoto calcinado)

As partículas de LEC incorporadas ao solo fazem com que ocorra uma diminuição da fração das partículas de argila de 60 para 37%. A quantidade de silte aumenta de 19 para 34%, enquanto que a areia aumenta na proporção de 21 para 29%.

Inicia-se um processo de incorporação de argila pelo silte e pela areia, aumentando a dimensão de grãos, continuando o composto desuniforme e bem graduado, como se verifica na Figura 19.

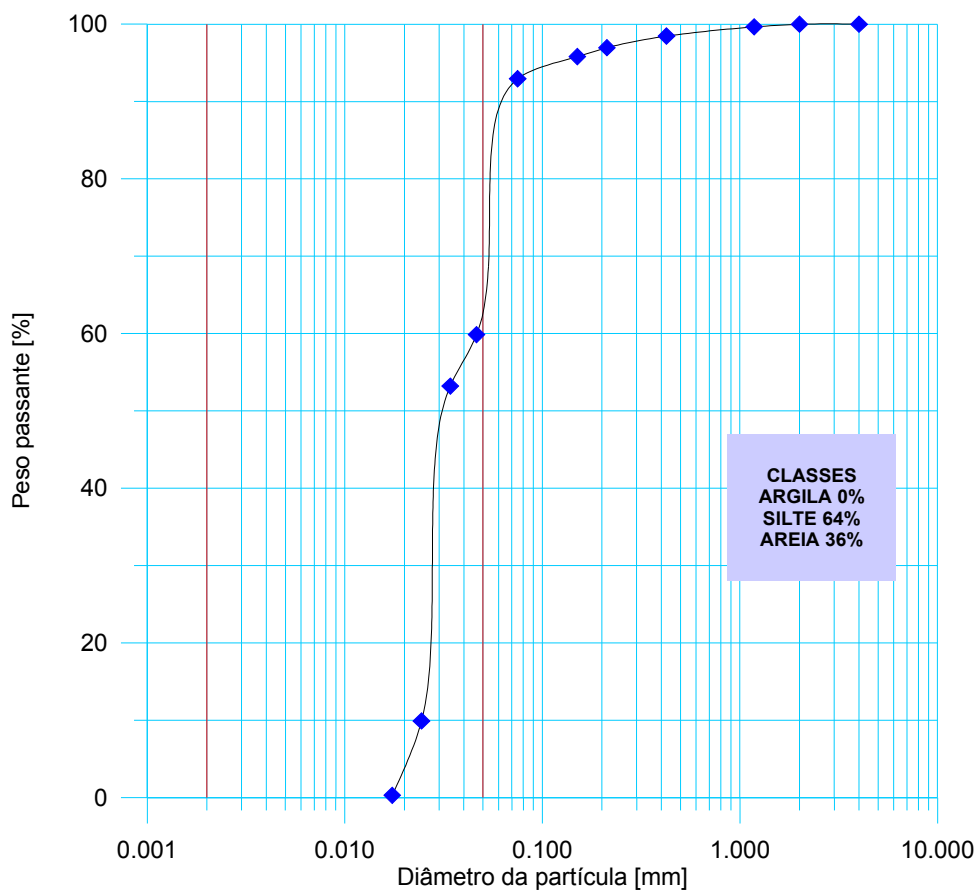


**Figura 19** - Curva granulométrica do tratamento T1.

## 4.1.4.3 T2 (solo com 17,5% de lodo de esgoto calcinado)

Na forma da curva granulométrica, mostrada na Figura 20 é possível observar mais uniformidade no composto, prevalecendo um aumento das frações de silte de 34 para 64% e um aumento na fração de areia de 29 para 36%, com ausência de argila, devido à incorporação dessas partículas pelo LEC.

As partículas de LEC agregaram os grãos de argila, tornando mais grossos os grãos do composto. Este efeito também foi observado por GUIMARÃES (1980), que o atribuiu à incorporação química da argila através do cálcio existente na cal.

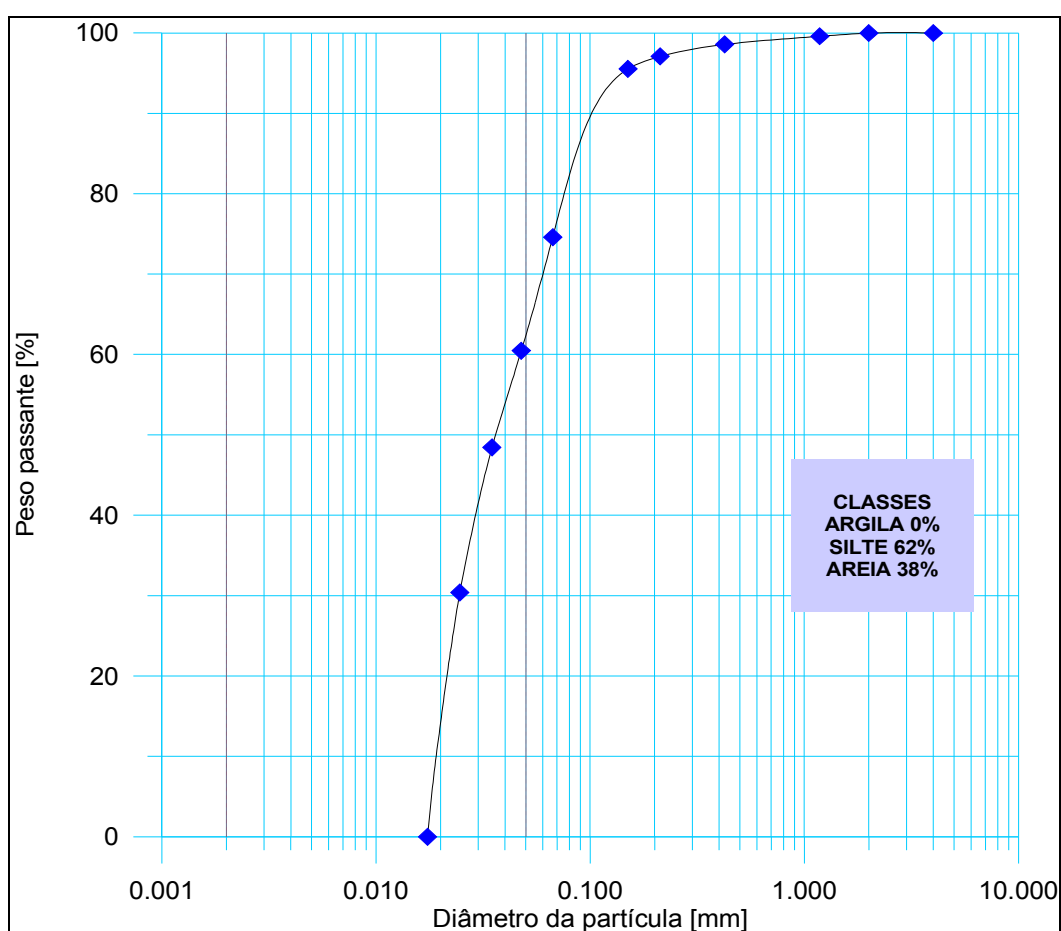


**Figura 20** - Curva granulométrica do tratamento T2.

#### 4.1.4.4 T3 (solo com 28,5% de lodo de esgoto calcinado)

A curva granulométrica, observada na Figura 21, apresenta-se contínua e uniforme, ocorrendo um pequeno acréscimo de areia de 36 para 38% e um decréscimo de silte, de 64 para 62%, com ausência de argila.

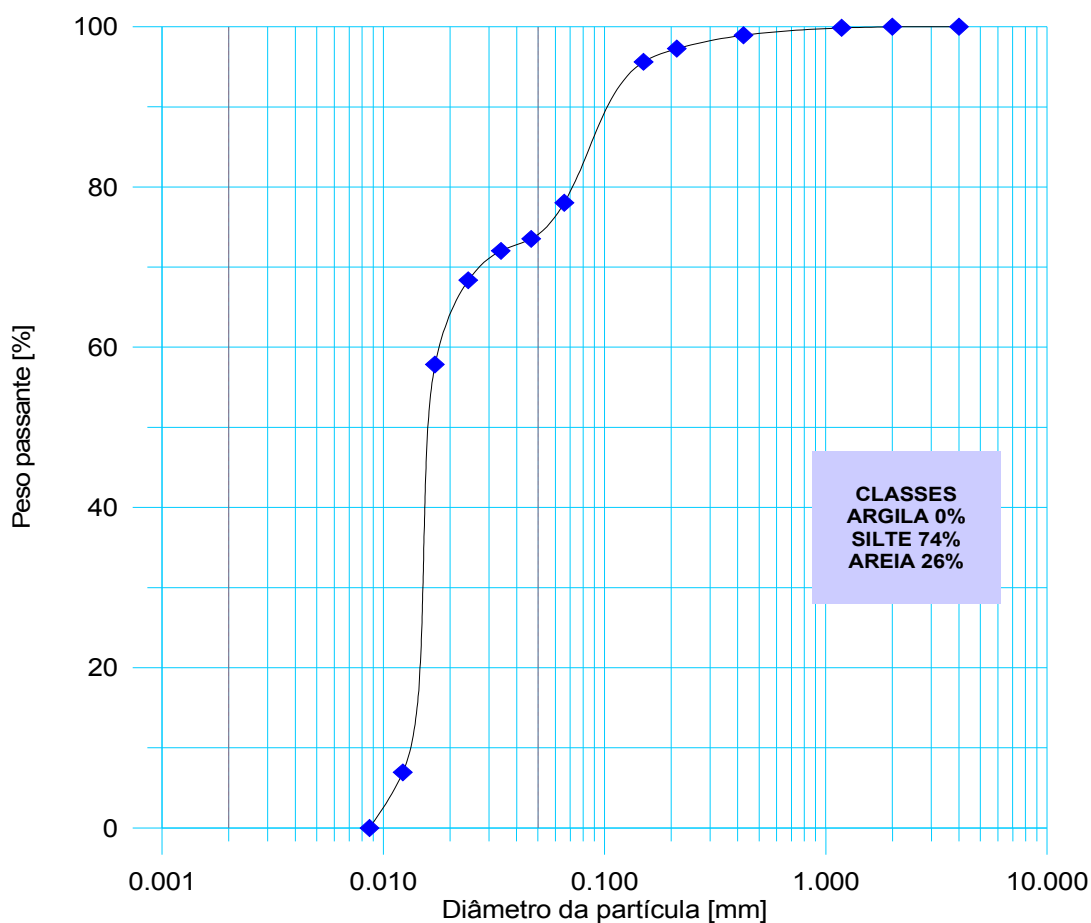
O tratamento T3 transforma a amostra de solo em grãos maiores, prevalecendo o silte e a areia, com ausência de argila, semelhante ao tratamento anterior (T2).



**Figura 21** - Curva granulométrica do tratamento T3.

## 4.1.4.5 T4 (solo com 43% de lodo de esgoto calcinado)

A curva granulométrica da Figura 22 permanece uniforme, com aumento do diâmetro dos grãos do composto, ocorrendo um acréscimo de silte de 62 para 74% e uma redução de areia de 38 para 26%, com ausência de argila. O lodo de esgoto calcinado levou o composto a uma faixa elevada de silte.

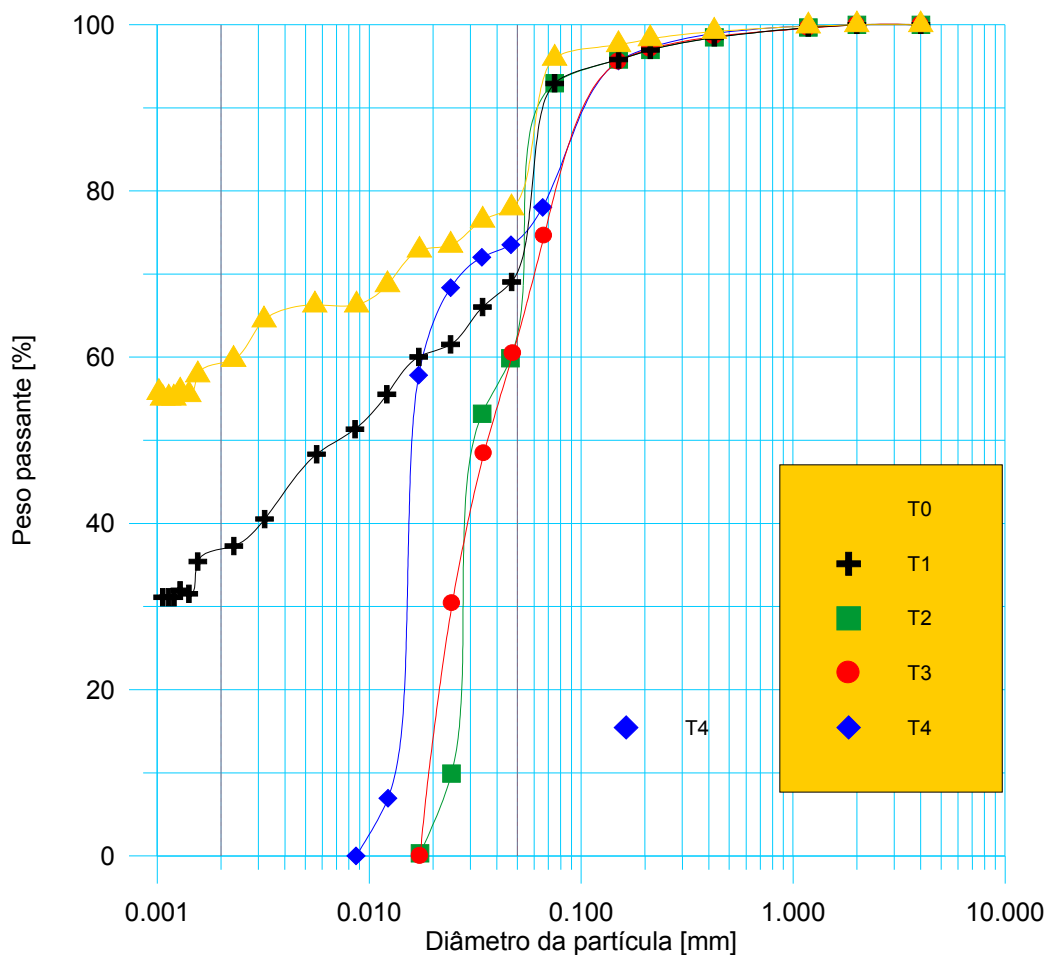


**Figura 22** - Curva granulométrica do tratamento T4.

#### 4.1.4.6 Comparação das curvas granulométricas dos compostos

A forma de curva é a mesma para os solos que têm composição granulométrica semelhante, ainda que as dimensões de suas partículas difiram (CAPUTO, 2006).

Segundo a forma das curvas observadas na Figura 23, podem-se distinguir as variações da granulometria dos compostos. Nos compostos T2, T3 e T4, a granulometria é uniforme, enquanto que, nos tratamentos T0 e T1, a granulometria é desuniforme, com grande variação de dimensões de grãos.



**Figura 23** - Curva granulométrica de todos os tratamentos.



Conforme MENDONÇA *et al.* (1996), ressalta-se que mesmo solos argilosos quando estabilizados com cal adquirem uma textura friável, de aspecto mais granular do que o solo em seu estado natural.

## 4.2 DESEMPENHO MECÂNICO DOS COMPOSTOS

### 4.2.1 Índice de compactação

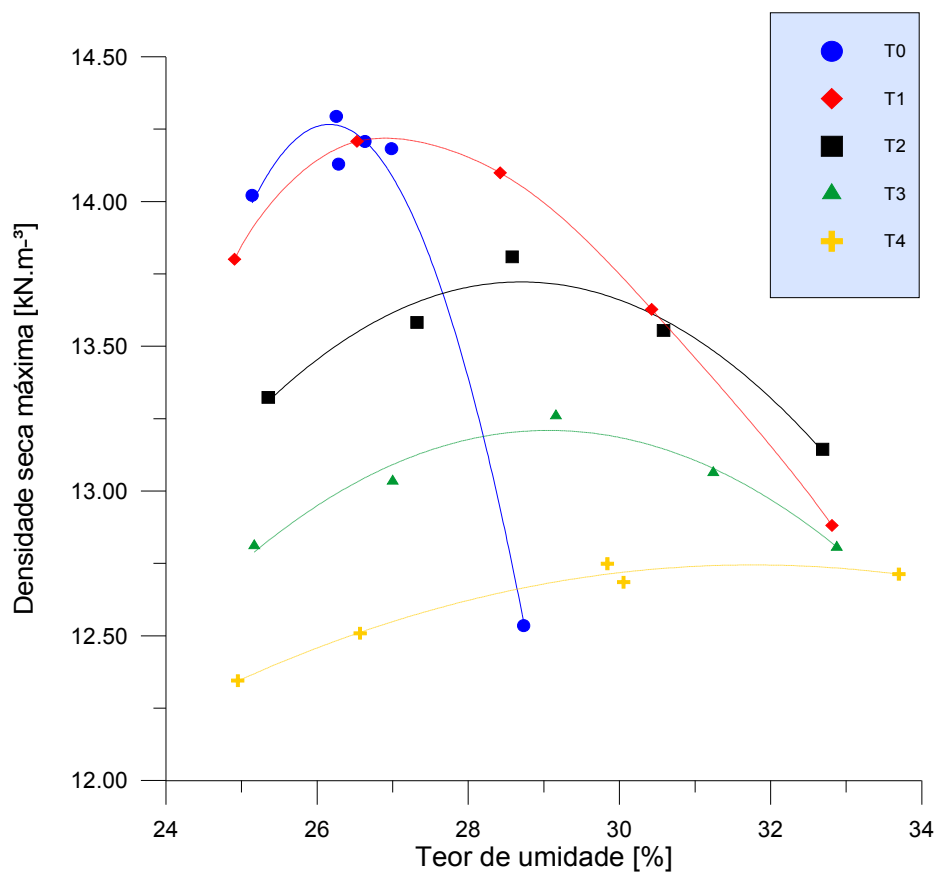
Os resultados dos ensaios de compactação na energia normal de Proctor, observados na Figura 24, para os compostos, exibem o seguinte comportamento: conforme se aumenta a quantidade de LEC, mais se necessita de água para se atingir a umidade ótima, com diminuição da massa específica aparente seca máxima.

Para o composto T0, chegou-se a uma umidade ótima de 26,3% para uma massa específica aparente seca máxima de 14,30 kN.m<sup>-3</sup>. Para o composto T1, chegou-se a uma umidade ótima de 27,5% para uma massa específica aparente seca máxima de 14,15 kN.m<sup>-3</sup>. No tratamento T2 chegou-se a uma umidade ótima de 28,5% para uma massa específica aparente seca máxima de 13,70 kN.m<sup>-3</sup>. Em relação ao tratamento T3, a umidade ótima a que se chegou foi de 29% para uma massa específica aparente seca máxima de 13,20 kN.m<sup>-3</sup>. Por fim, para o tratamento T4 chegou-se a uma umidade ótima de 31,3% para uma massa específica aparente seca máxima de 12,77 kN.m<sup>-3</sup>.

De acordo com o estudo realizado em Viçosa (MG), por MENDONÇA *et al.* (1996), para um Solo Saprolítico, com misturas de cal nas proporções de 2, 6 e 10%, chegou-se a uma umidade ótima de 24,3% para uma massa específica aparente seca máxima de 15,10 kN.m<sup>-3</sup> e, para um Latossolo Vermelho-Amarelo, chegou-se a uma umidade ótima de 31,5% para uma massa específica aparente seca máxima de 14,18 kN.m<sup>-3</sup>.

Segundo DALLACORT *et al.* (2002, p. 514), com relação ao uso de solo estabilizado com cimento e produto cerâmico moído,

[...] a influência da umidade do solo na massa específica do solo-cimento, até o valor ótimo, está ligada à lubrificação das partículas do solo, que lhes permite melhor rearranjo, de forma a ocupar o menor volume possível. Ultrapassado o valor ótimo, a água começa a ocupar espaço entre as partículas, provocando diminuição da densidade; já o material ligante, composto pelo cimento e pelo resíduo de blocos moídos, além de criar, com sua hidratação, um esqueleto sólido entre os grãos do solo, tem também o efeito de *micro-filler*, preenchendo os pequenos vazios entre as partículas de solo, interferindo na massa específica do material.



**Figura 24** - Curvas de compactação dos tratamentos.

Como esperado, a adição de lodo de esgoto calcinado (tendo em sua composição a presença de cal) promoveu aumento nos valores de umidade ótima. Verificou-se, ainda, uma tendência de redução da massa específica aparente seca máxima à medida que os teores de lodo de esgoto calcinado

aumentaram. Isso evidencia que a mistura compactada tendeu a se apresentar mais porosa, conforme relatam MENDONÇA *et al.* (1996), em seu estudo da estabilização de solo com adição de cal. As curvas de compactação das misturas solo-lodo de esgoto calcinado apresentaram valores de massa específica aparente seca máxima abaixo daqueles do solo natural e os teores ótimos de umidade se deslocaram para valores mais altos, acompanhando o aumento do teor de lodo de esgoto calcinado das misturas. GUTIERREZ (1998), estudando os efeitos da adição de cal nas propriedades físicas e mecânicas de um solo argiloso, obteve o mesmo padrão de comportamento para a umidade ótima de compactação e a massa específica aparente seca máxima.

#### 4.2.2 Índice de retração

Conforme mostrado na Figura 25, com a adição de LEC, a retração (fissuras no corpo-de-prova dentro da caixa) diminuiu a partir dos 8% de LEC, ocorrendo o menor índice de retração com a proporção teórica de 28,5% de LEC no solo, sendo que, com incremento de LEC acima de 28,5%, ocorreu um aumento da retração.

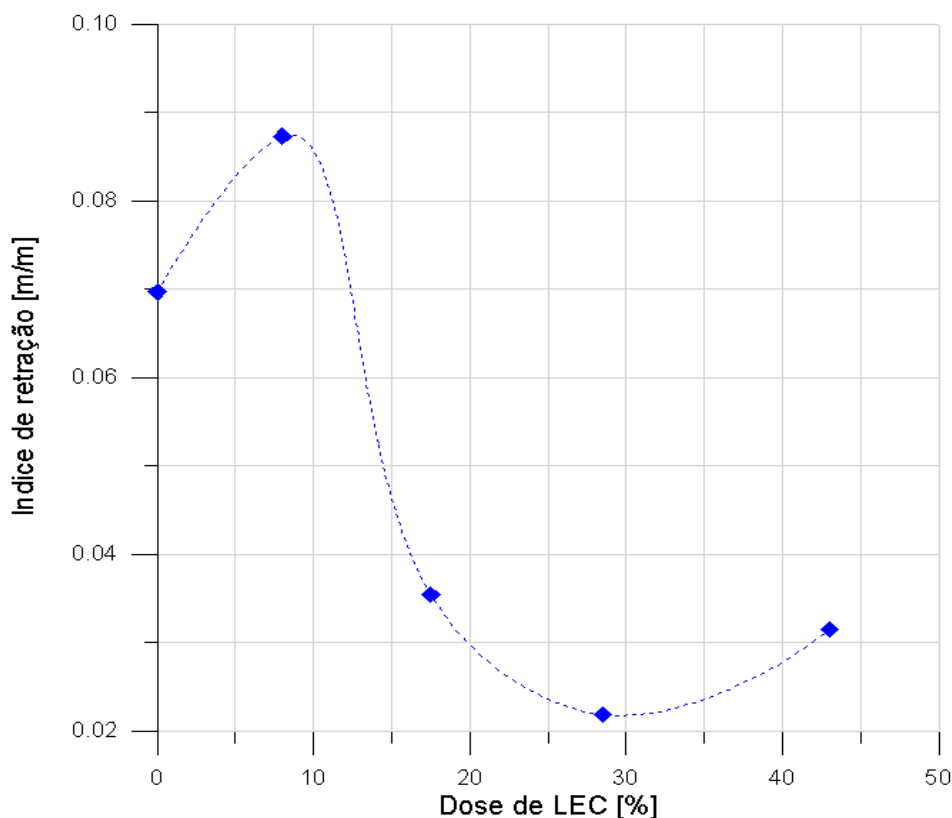
Com o cálcio presente na cal do LEC, resultante em aluminatos e silicatos, estes detentores de grande capacidade cimentante pozolânica (GUIMARÃES, 1980), é possível traçar uma analogia com os resultados do solo-cimento.

De acordo com PITTA (1983), a adição de alguns compostos em solos muito finos tem como objetivo diminuir consideravelmente a retração total. A cal possui características de plasticidade que compensam a retração, acomodando maiores deformações do solo e diminuindo, conseqüentemente, o índice de retração.

Segundo COSTA & LOLLO (2007, p. 118), em estudo de solo estabilizado com cal,

[...] o tempo de cura mostrou uma influência importante no comportamento contrátil das misturas e uma redução dos valores de retração com o tempo, devido à hidratação das moléculas do

aglomerante que faz com que ocorram as reações químicas responsáveis pela cimentação dos grãos do solo. Quanto maior o tempo de cura mais resistente fica a mistura, fazendo com que a perda de água para o meio não conduza a processos significativos de retração.



**Figura 25** - Índice de retração dos tratamentos.

#### 4.2.3 Resistência ao cisalhamento na compressão triaxial

As características de cisalhamento do solo são representadas pela coesão do solo, pelo ângulo de atrito interno e pela resistência do solo ao cisalhamento (ORTIGÃO, 1995). A coesão do solo é a força de atração entre as superfícies de suas partículas, podendo ser real ou aparente. A coesão real é resultado do efeito de agentes cimentantes, como teor de óxidos e de argilas silicatadas (MULLINS & BENGHOUGH, 1990), bem como o resultado da atração entre partículas próximas por forças eletrostáticas (MITCHELL, 1976).

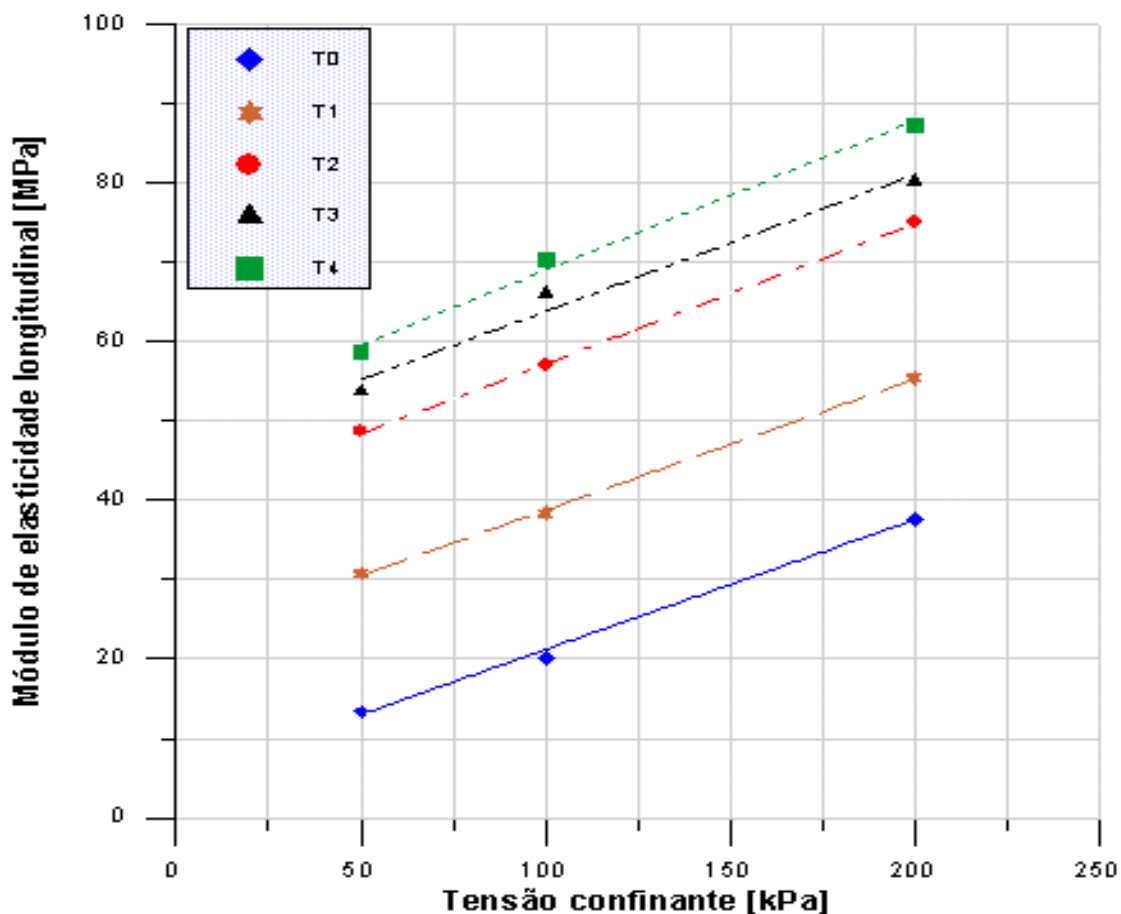
A coesão aparente é resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, formando meniscos de água entre as partículas dos solos parcialmente saturados, que tendem a aproximá-las entre si. A coesão aparente constitui uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos parcialmente saturados (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

A resistência do solo ao cisalhamento é determinada pelas características coesivas e friccionais entre as partículas do solo, sendo definida como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura (SOUZA PINTO, 2000). Os principais fatores que influenciam a resistência do solo ao cisalhamento são a distribuição de partículas do solo, a densidade, a estrutura e o teor de água no solo (McKYES *et al.*, 1994). Em solos de textura arenosa, a resistência ao cisalhamento depende basicamente do atrito entre as partículas, enquanto em solos argilosos ela depende não só do atrito entre partículas, mas também da coesão do solo (LEBERT & HORN, 1991).

#### 4.2.3.1 Módulo de elasticidade longitudinal

Observa-se, na Figura 26, que os tratamentos provocaram grande incremento nos valores do módulo de elasticidade, e, sendo este incremento consistentemente linear, com coeficientes angulares variando de 0,15 a 0,17, mostrando a alta correlação entre os parâmetros estudados. Observaram-se também efeitos significativos do confinamento (tensões confinantes) nos valores de E.

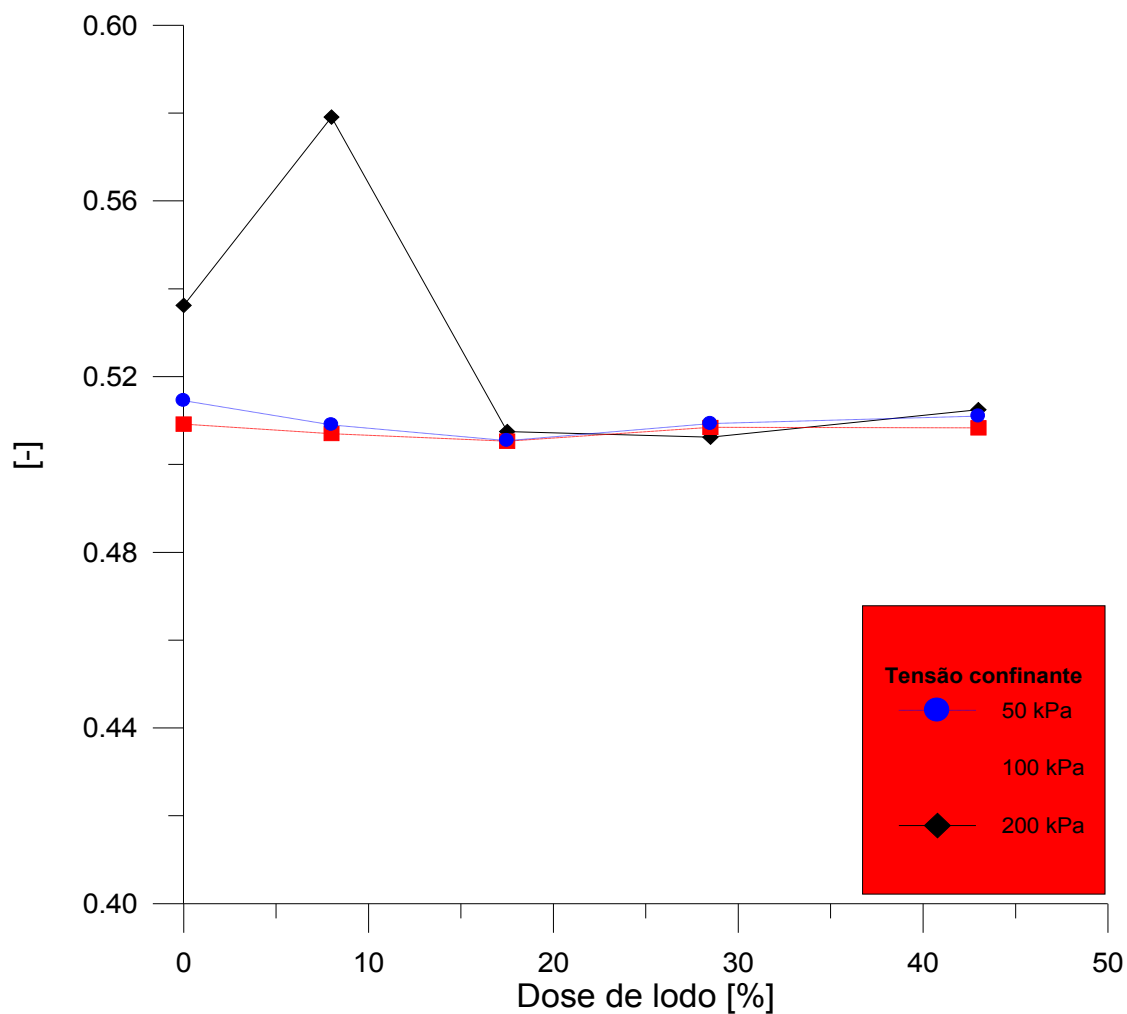
Os resultados demonstram que o LEC apresenta grande potencial de uso como um resíduo capaz de aumentar a rigidez do solo.



**Figura 26** - Efeito dos tratamentos e do confinamento no módulo de elasticidade longitudinal.

#### 4.2.3.2 Coeficiente de Poisson

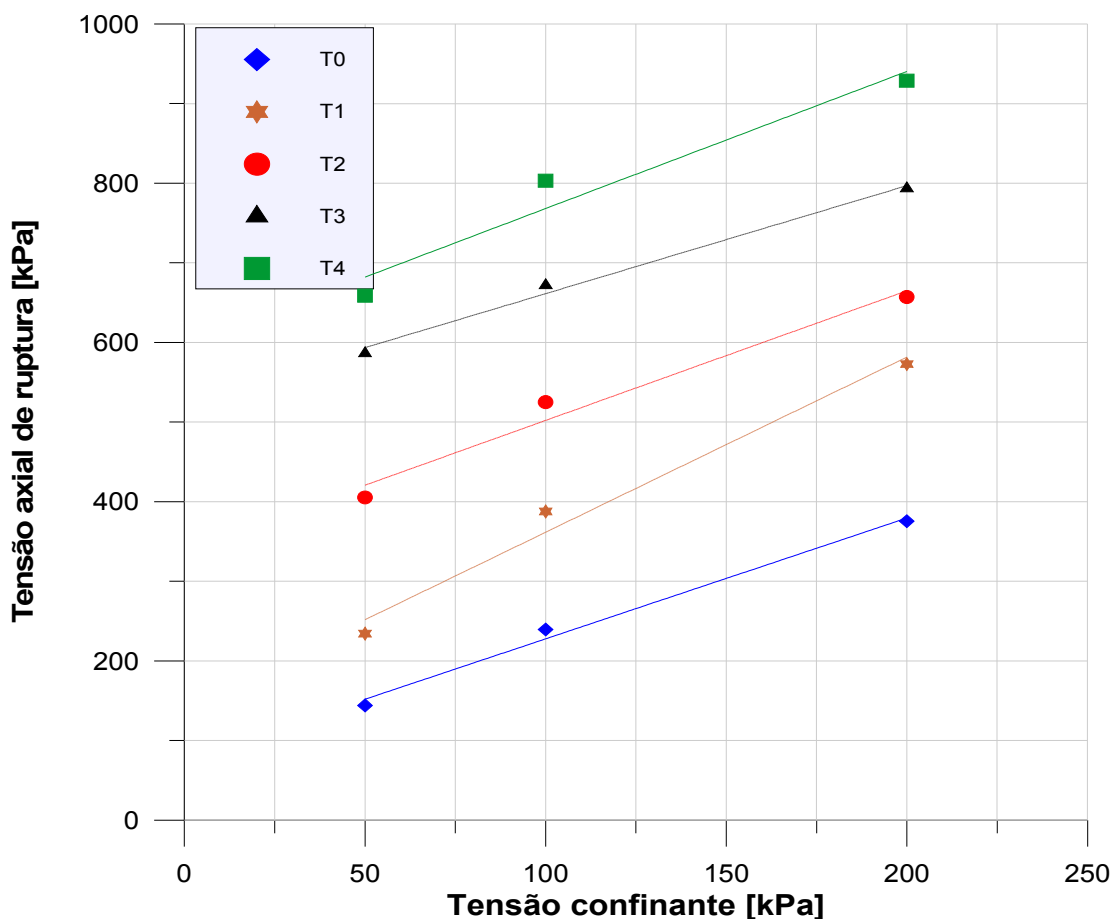
Conforme demonstrado na Figura 27, não há diferença significativa entre os valores do  $\nu$  para os diferentes tratamentos e também para as diferentes tensões confinantes, apresentando valor médio de 0,5091.



**Figura 27** - Gráfico ilustrativo do Coeficiente de Poisson.

#### 4.2.3.3 Tensão principal maior na ruptura

Houve influência dos tratamentos na tensão principal maior de ruptura  $\sigma_{1f}$ . As tensões de ruptura exibem valores mais elevados para maiores dosagens. A relação mostra-se linear e, à exceção do tratamento 8,0%, as curvas apresentam inclinações muito próximas. Também foi observado efeito das tensões confinantes na tensão de ruptura, como mostrado na Figura 28.



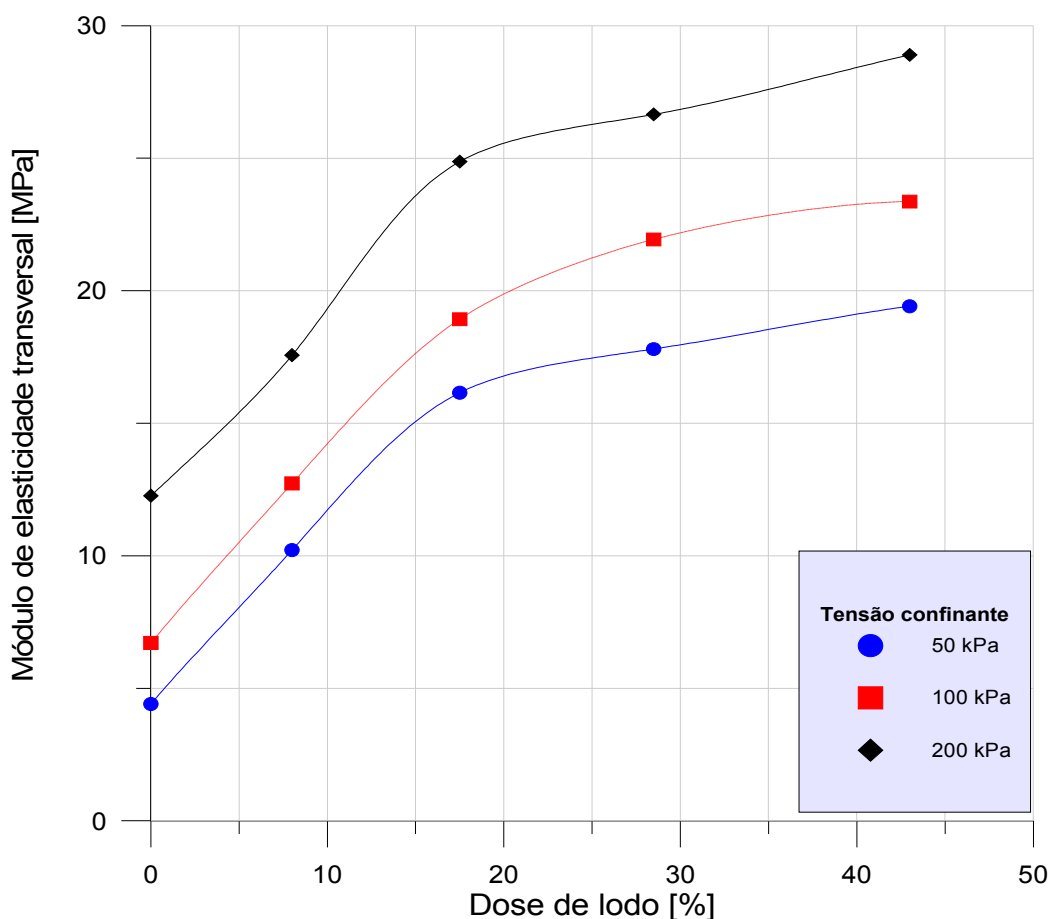
**Figura 28** - Comportamento da tensão principal maior de ruptura.

O tratamento T4 chegou a 930 kPa de tensão de ruptura, valor próximo a 1 MPa; sendo que a resistência exigida pela norma para a fabricação de tijolos para alvenaria é de 0,7 e 1,0 MPa (SABBATINI, 1998). Comparando com o estudo experimental da resistência à compressão do solo-cimento, com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído de DALLACORT *et al.* (2002, p. 518) tem-se que “os resíduos de material cerâmico moído apresentaram ação pozolânica e efeito *filler*. Obtiveram-se resistências superiores a 2MPa, com substituições de até 57%, para um teor de material ligante de 8% [...]”.



#### 4.2.3.4 Módulo de elasticidade transversal

Observa-se na Figura 29 o comportamento do módulo de elasticidade transversal ( $G$ ) em função dos tratamentos e das tensões confinantes. Pode-se notar que a doses menores ocorre efeito pronunciado dos tratamentos, e, a partir de 17,5 %, verifica-se uma tendência à estabilidade nos valores de  $G$ . Esses resultados sugerem um progressivo enrijecimento estrutural no composto, provocado pelo LEC. Uma elevada rigidez transversal é característica de materiais elásticos de engenharia, tais como aço, concreto e madeira, por exemplo. Isto sugere que o LEC está promovendo uma mudança da própria natureza do material, o qual deixa de se comportar plasticamente como os solos e passa a se comportar como materiais rígidos.



**Figura 29** - Comportamento do módulo de elasticidade transversal.

Observa-se, ainda, o efeito do confinamento muito consistente em ambas as faixas de comportamento, pois em ambas as regiões o paralelismo entre as curvas é notável.

#### 4.2.4 Envoltórias de ruptura para ensaios triaxiais consolidados não drenados (Círculos de Mohr)

Nas figuras 30, 31, 32, 33 e 34, estão mostrados os círculos de Mohr obtidos nos ensaios triaxiais consolidados não drenados para os tratamentos aplicados.

Os círculos de Mohr para o tratamento T0 mostram tipicamente o comportamento de solos, em que a tensão confinante exerce efeito marcante, refletido no tamanho do círculo. Maior confinamento produz círculo maior, ou seja, é necessária uma tensão desviatória maior para que haja ruptura do material.

Progressivamente, o efeito das confinantes vai sendo atenuado, e parece que a dosagem 17,5 % é a fronteira entre os comportamentos. A partir desta dosagem, a diferença nos tamanhos dos círculos torna-se pequena.

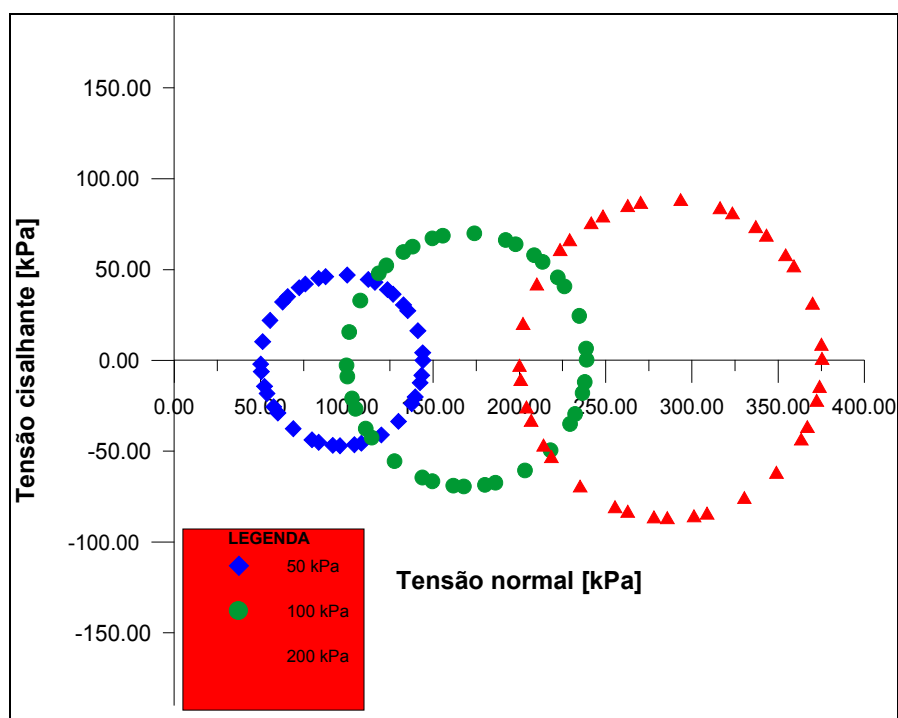


Figura 30 - Círculo de Mohr para o composto T0.

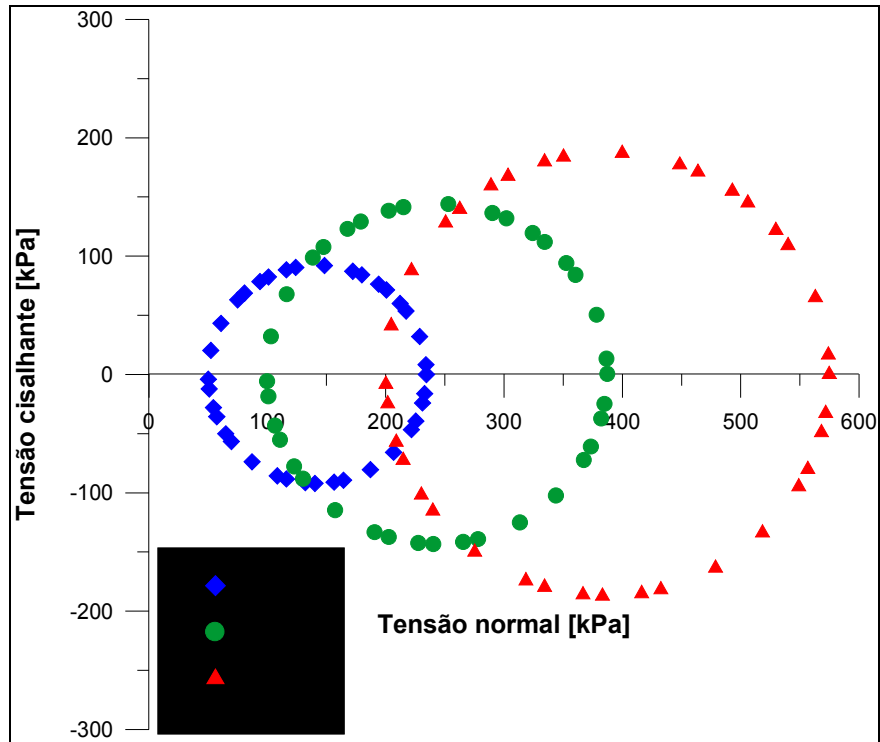


Figura 31 - Círculo de Mohr para o composto T1.

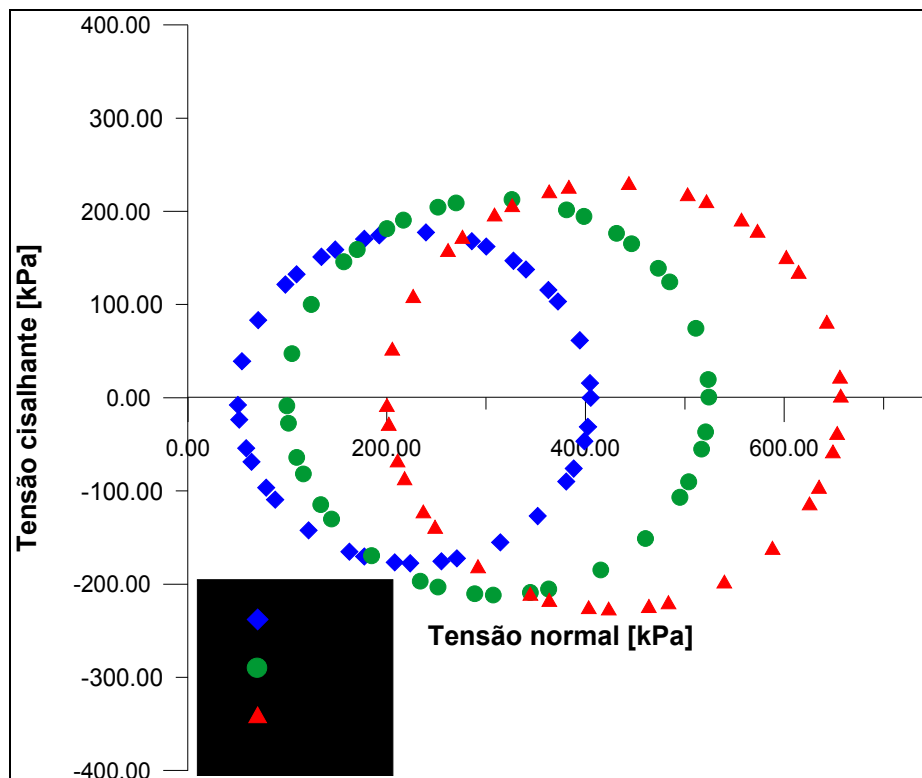
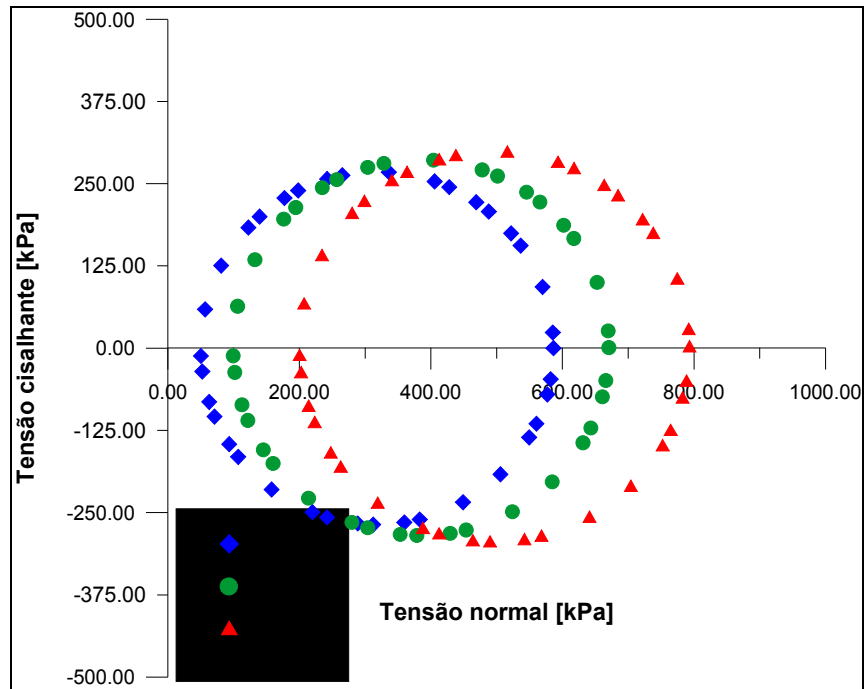
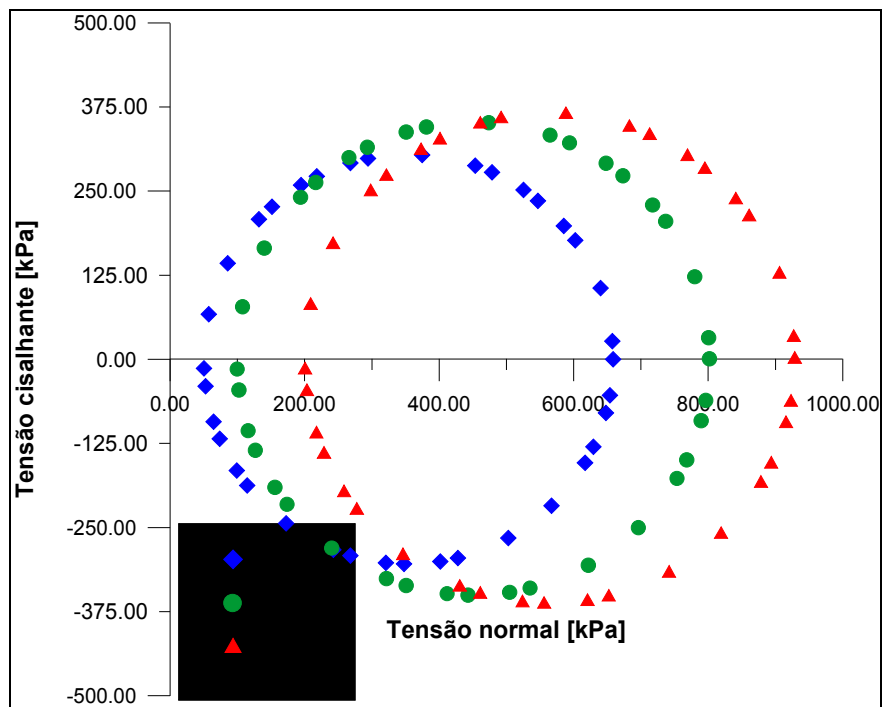


Figura 32 - Círculo de Mohr para o composto T2.



**Figura 33** - Círculo de Mohr para o composto T3.

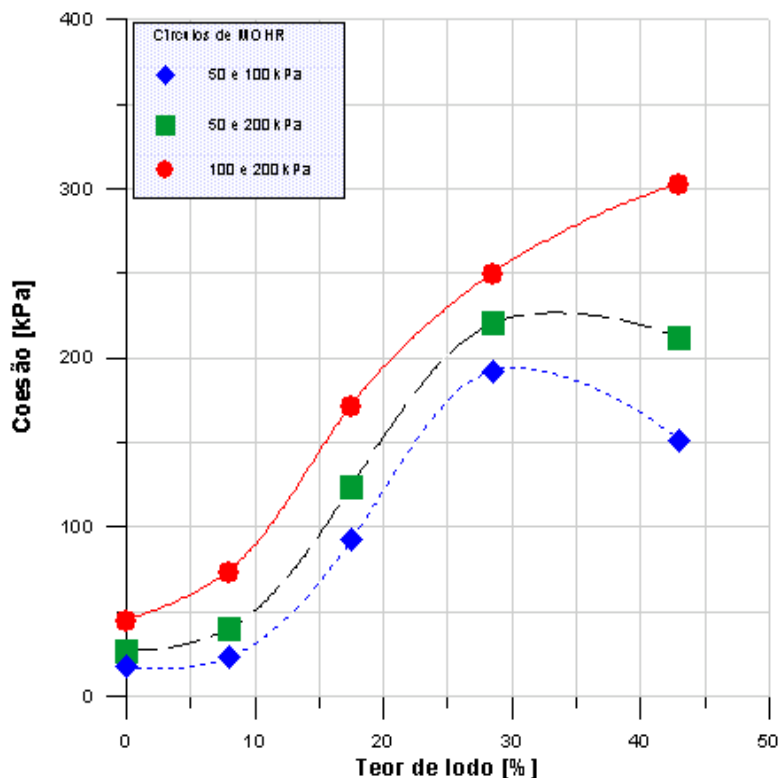


**Figura 34** - Círculo de Mohr para o composto T4.

Em termos de parâmetros de resistência do material, os tratamentos proporcionam incrementos significativos na coesão e redução no ângulo de atrito e as envoltórias de ruptura progressivamente vão se tornando menos inclinadas e mais altas.

#### 4.2.5 Coesão dos compostos em função do teor de LEC

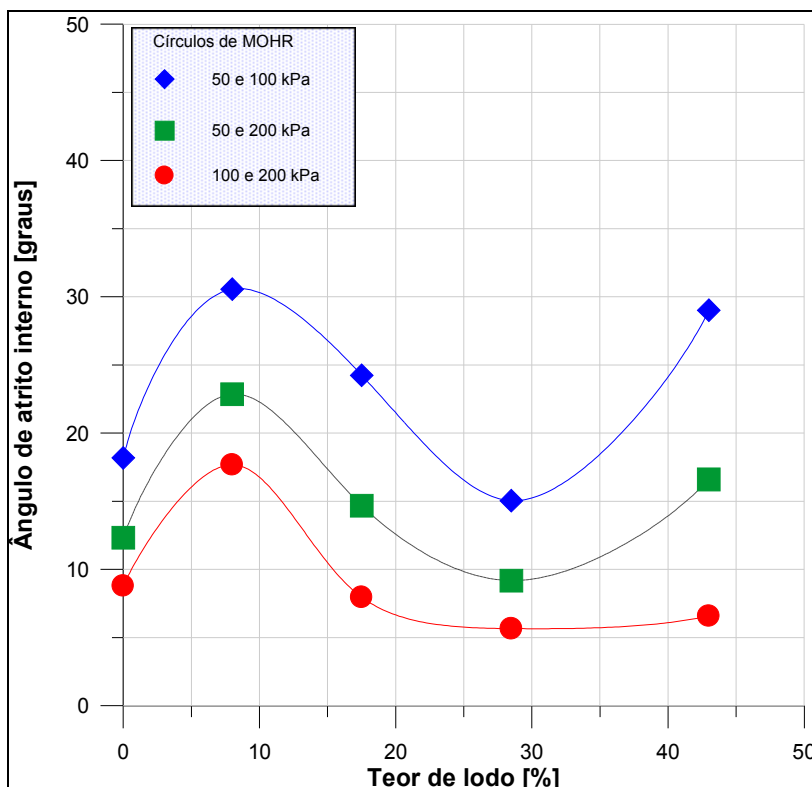
Os valores de coesão obtidos com os tratamentos são mostrados na Figura 35, considerando-se diferentes pares de círculos de Mohr para sua obtenção. O par correspondente aos círculos de 100 e 200 kPa apresentou dados mais consistentes, notando-se uma tendência crescente na coesão com os tratamentos. Para os pares correspondentes aos círculos de 50 e 100 kPa e de 50 e 200 kPa, houve um ligeiro decréscimo na coesão no tratamento T4. A taxa de incremento da coesão mostrou-se muito baixa até a dosagem 8,0 %, passando a ser muito acentuada até o tratamento 28,5 %.



**Figura 35** - Comportamento da coesão dos compostos em função do teor de LEC.

#### 4.2.6 Ângulo de atrito interno dos compostos em função do teor de LEC

Na Figura 36 é mostrado o comportamento do ângulo de atrito interno em função dos tratamentos aplicados.



**Figura 36** - Comportamento do ângulo de atrito interno dos compostos em função do teor de LEC.

SILVA & CARVALHO (2008) definem que o ângulo de atrito interno do solo representa as características friccionais entre as partículas do solo, sendo definido como o ângulo máximo que a força transmitida ao solo pode fazer com a força normal à superfície de contato, sem que haja o cisalhamento do solo no plano de ruptura. O ângulo de atrito interno do solo depende de fatores como grau de compactação, percentagem e tipo de argila, tamanho e forma dos grãos de areia do solo (SOUZA PINTO, 2000).

As curvas relacionando o ângulo de atrito com as doses aplicadas devem ser analisadas em conjunto com as curvas de coesão. Na região em que a taxa de incremento da coesão foi insignificante, ocorreu um acentuado acréscimo no ângulo de atrito; na região de acentuado crescimento da coesão, houve uma forte queda nos valores do ângulo de atrito. Esses resultados estão consistentes com o comportamento dos materiais de engenharia, nos quais os parâmetros de resistência ao cisalhamento coesão e ângulo de atrito são inversamente relacionados. Por exemplo, solos muito arenosos exibem elevados valores de ângulo de atrito e baixos valores de coesão, e solos muito argilosos exibem valores elevados de coesão e baixos valores de ângulo de atrito.

VARGAS (2004) destaca que o ângulo de atrito interno de uma argila saturada adensada fica, normalmente, entre 20 e 30°. Os resultados desta pesquisa situaram os valores entre 10 e 30°.

O principal efeito da adição de cal aos solos reativos, do ponto de vista dos parâmetros de resistência ao cisalhamento determinados em ensaios triaxiais, manifesta-se em aumentos substanciais na coesão e, em escala reduzida, no ângulo de atrito, o que traz dificuldades para a adequada avaliação do efeito da adição de cal no comportamento deste último parâmetro (THOMPSON, 1967).

Ainda, conforme MENDONÇA *et al.* (1996 p. 530), “nota-se [...] que aumentos significativos na coesão mantêm uma relação direta com aumentos no teor de cal, de forma inequívoca [...]”.

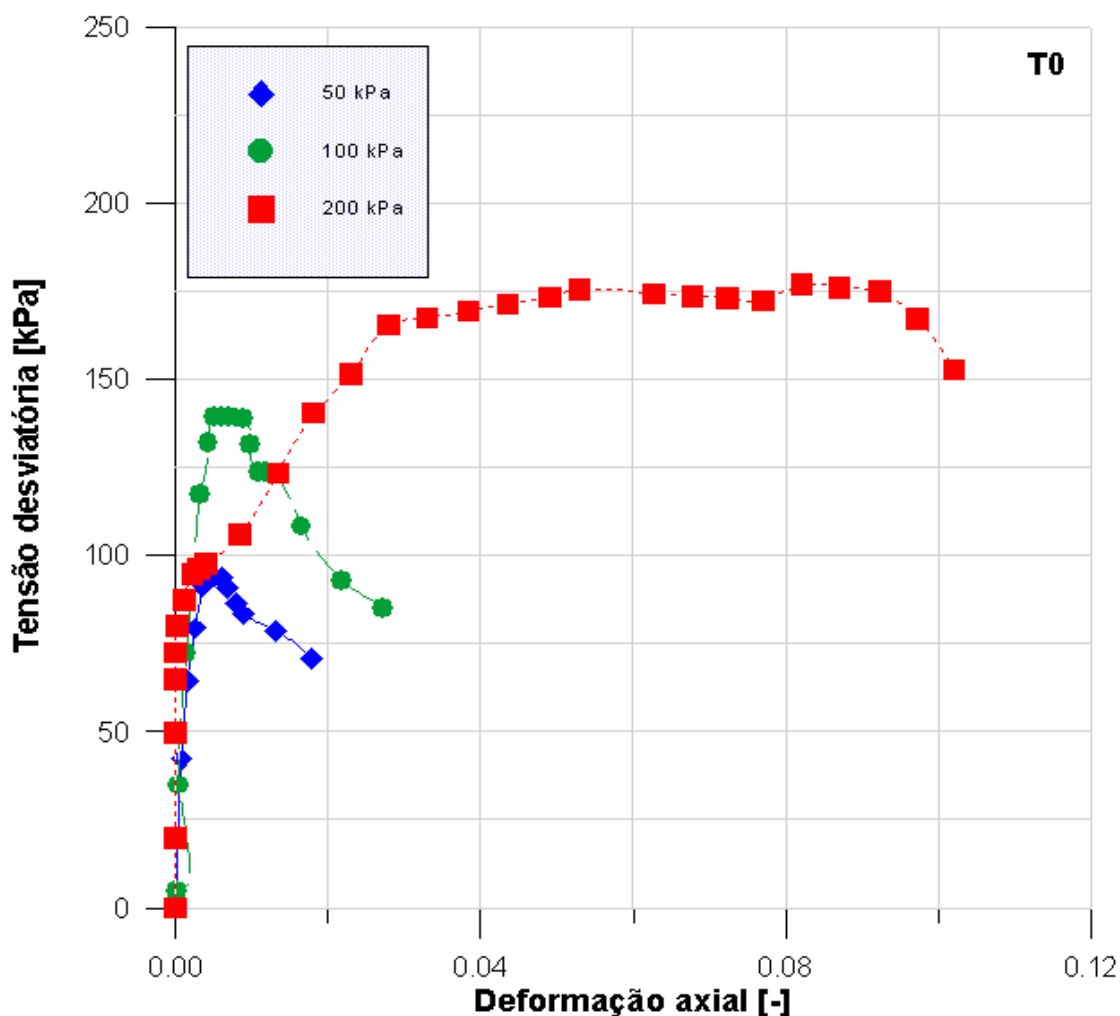
#### **4.2.7 Comportamento tensão-deformação dos compostos**

##### **4.2.7.1 T0 (solo testemunha)**

A Figura 37 mostra as curvas tensão desviatória em função da deformação axial, para o tratamento T0, nas três tensões confinantes aplicadas. O comportamento tensão-deformação apresenta, inicialmente, uma

região de deformações puramente elásticas, em seguida uma região de escoamento plástico até a ruptura do material. Maiores tensões confinantes induzem maiores tensões de ruptura, sendo este efeito bastante pronunciado. Este comportamento é típico de solos argilosos.

De acordo com WOOD (1991, p. 486), “[...] *volumetric deformations play an important role in influencing the mechanical behavior of soils because of the changing relative positions of soil particles that volumetric deformations imply*”<sup>3</sup>.



**Figura 37** - Comportamento tensão-deformação para o tratamento T0.

<sup>3</sup> “[...] as deformações volumétricas têm um papel importante no que concerne a influenciar o comportamento mecânico dos solos devido às mudanças relativas de posição das partículas do solo implicadas nas próprias deformações volumétricas.” Tradução livre.



## 4.2.7.2 T1 (solo com 8% de lodo de esgoto calcinado)

Na Figura 38 são mostradas as curvas tensão-deformação para o tratamento T1, nos níveis de confinamento aplicados. O comportamento do material ainda é elástico seguido de escoamento, com ruptura plástica. Observa-se, também, que maiores tensões confinantes provocam maiores tensões de ruptura e o efeito é menos pronunciado que para o tratamento T0.

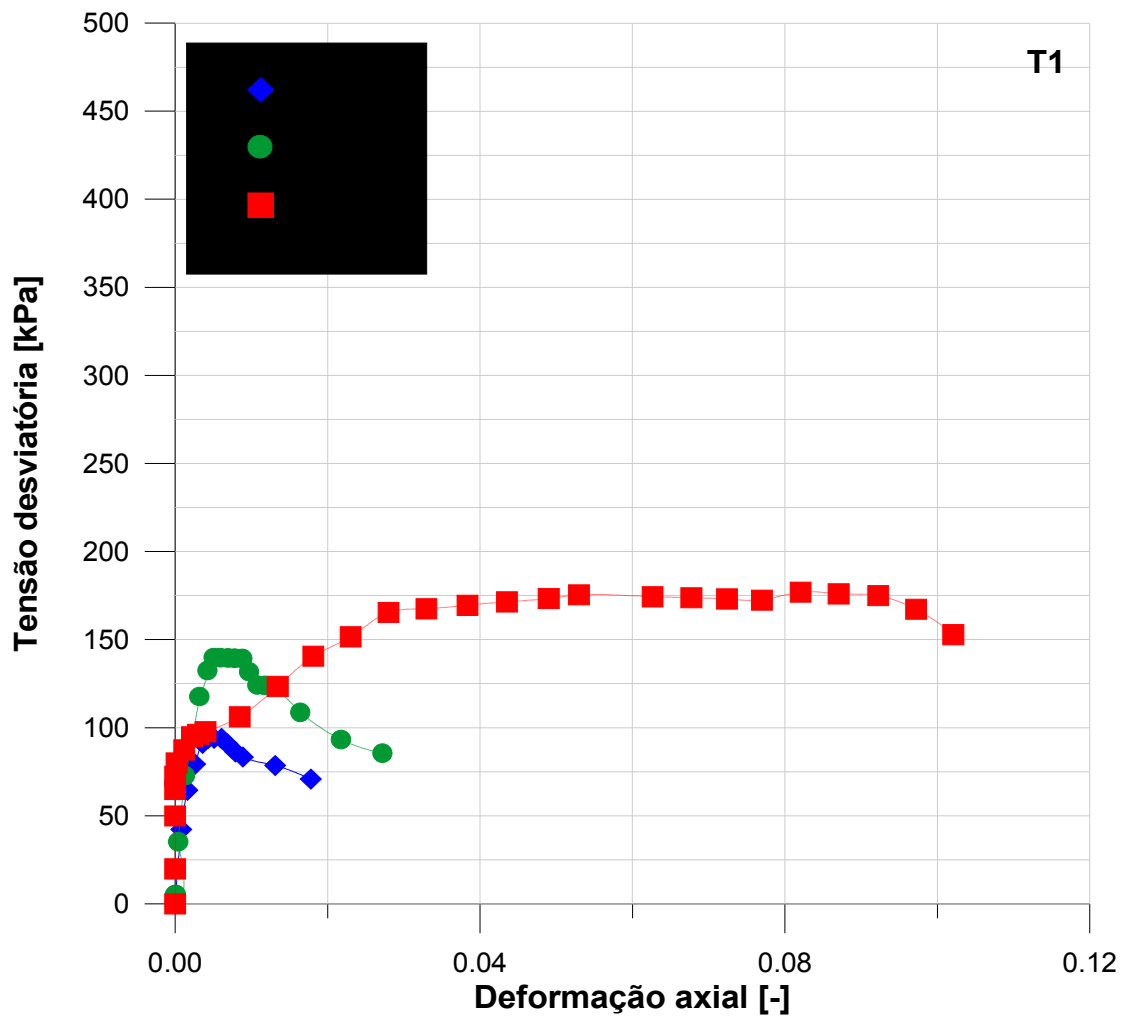


Figura 38 - Comportamento tensão-deformação para o tratamento T1.

## 4.2.7.3 T2 (solo com 17,5% de lodo de esgoto calcinado)

Na Figura 39, observa-se nitidamente a ausência de patamar de escoamento nas curvas tensão-deformação. O comportamento é puramente elástico, caracterizando uma ruptura frágil, tal como ocorre em materiais de engenharia rígidos.

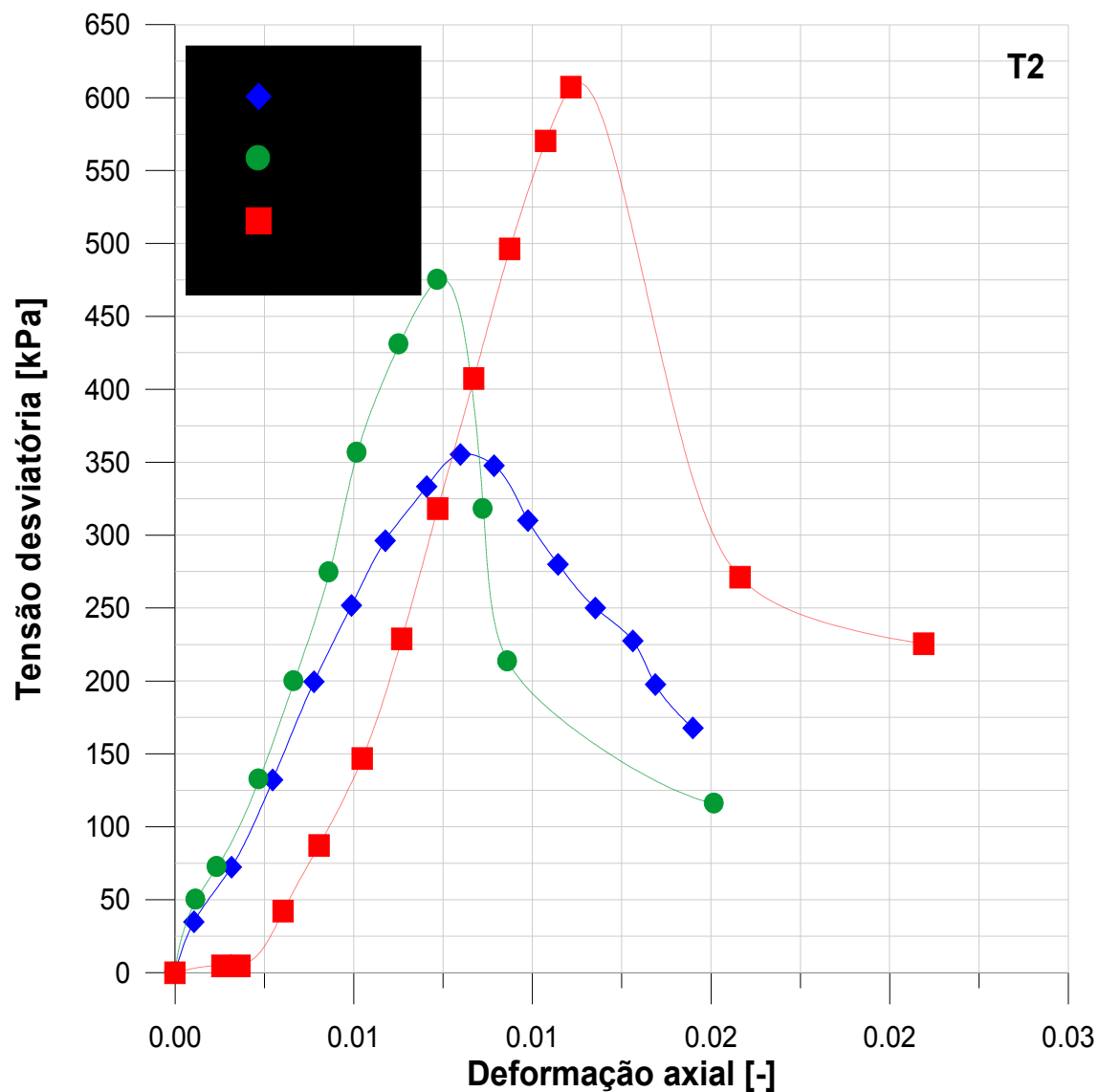


Figura 39 - Comportamento tensão-deformação para o tratamento T2.

## 4.2.7.4 T3 (solo com 28,5% de lodo de esgoto calcinado)

Na Figura 40 observa-se o efeito do tratamento T3 na relação tensão-deformação. O comportamento é puramente elástico, mostrando que o composto tornou-se um material rígido. Não se observa efeito significativo das tensões confinantes de 100 e 200 kPa, mas ainda ocorre efeito em relação à tensão de 50 kPa.

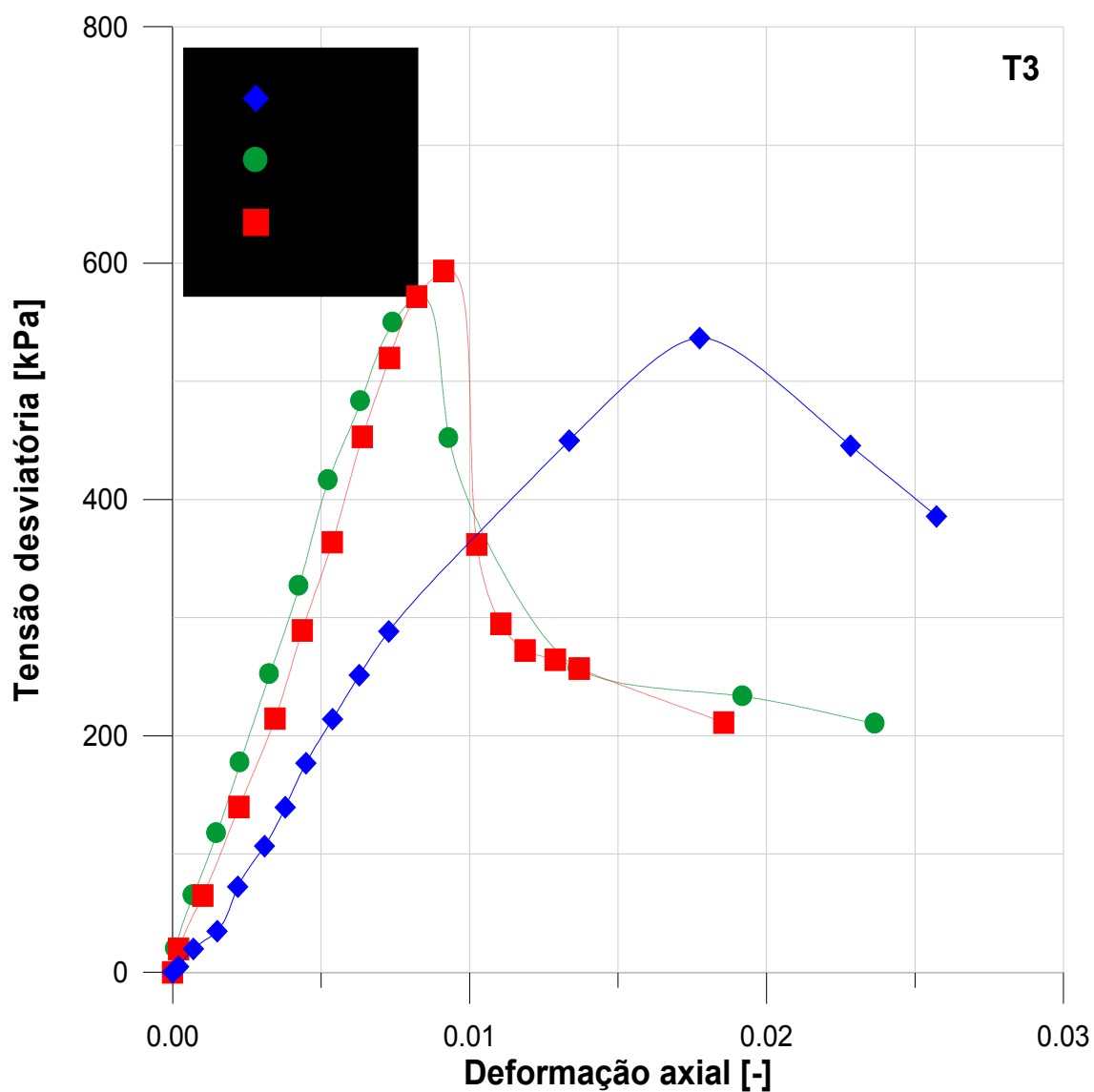


Figura 40 - Comportamento tensão-deformação para o tratamento T3.

## 4.2.7.5 T4 (solo com 43% de lodo de esgoto calcinado)

Na Figura 41 são apresentadas as curvas tensão-deformação para o tratamento T4, nos níveis de confinamento aplicados. O comportamento é elástico, com ruptura frágil. Assim como ocorreu para o tratamento T3, o efeito confinamento só foi significativo entre a tensão de 50 kPa e as de 100 e 200 kPa. Entre as tensões confinantes de 100 e 200 kPa o efeito foi muito pequeno.

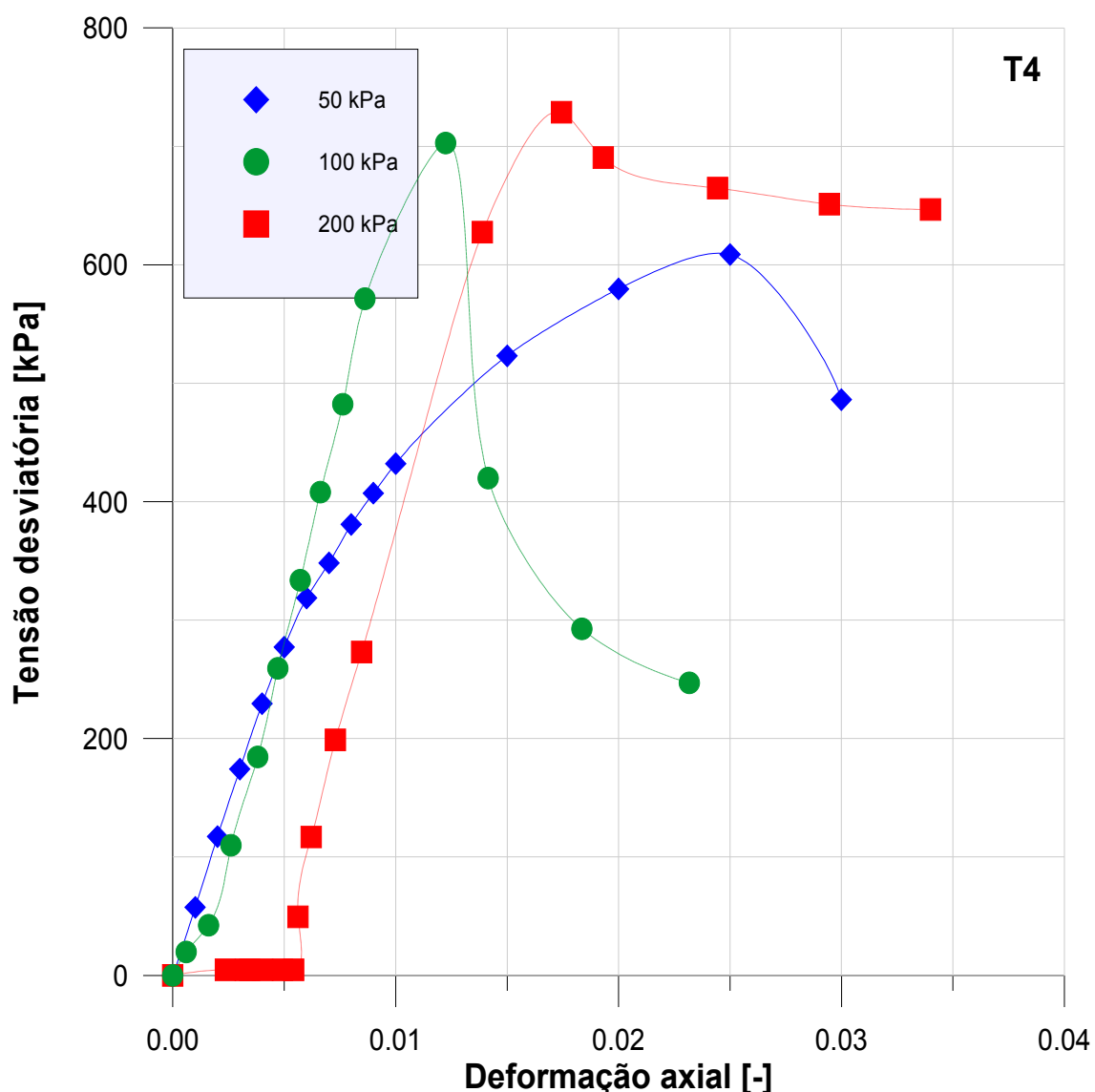


Figura 41 - Comportamento tensão-deformação para o tratamento T4

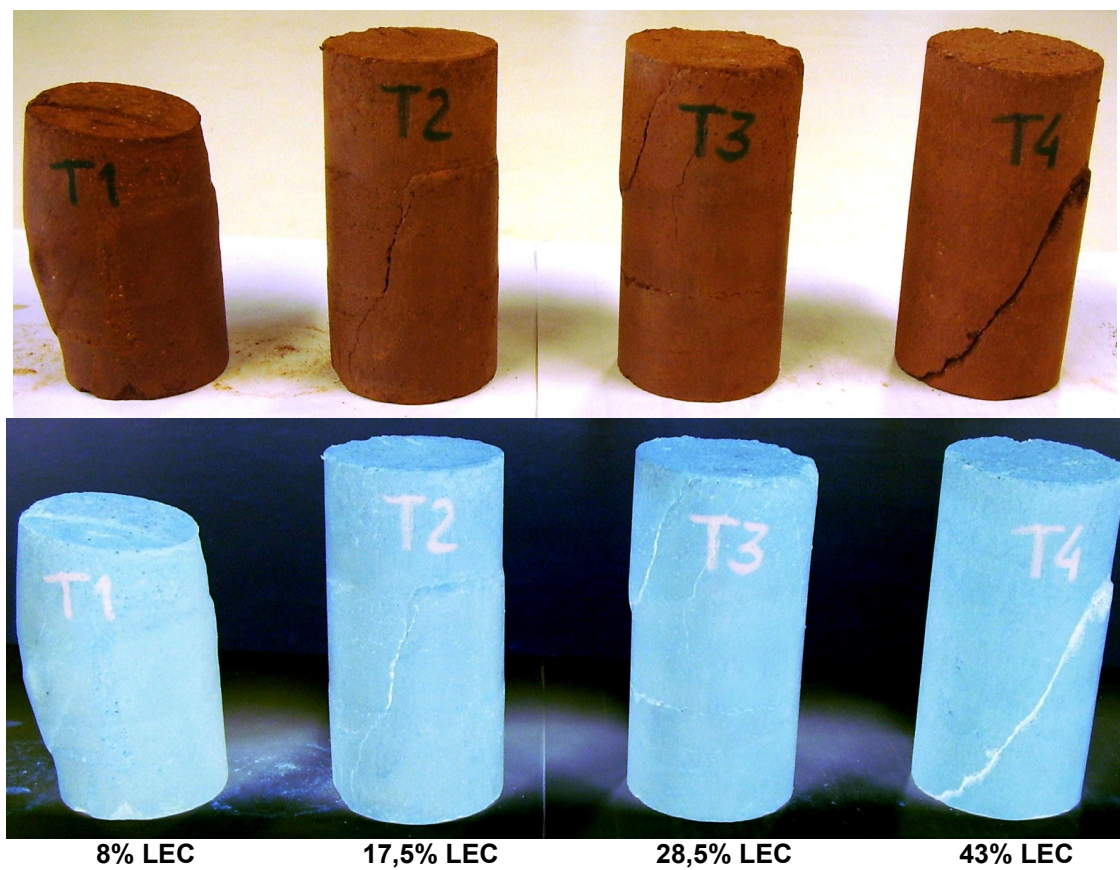
Segundo MENDONÇA *et al.* (1996, p. 523),

[...] quando trabalhando com solos de clima temperado, o desenvolvimento das curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios realizados [...] apontam para a impossibilidade de se definir um comportamento padrão das misturas solo-cal, para todos os solos. [...] foi observada uma dependência da deformação relativa à tensão desvio máxima com o tipo de solo, teor de cal e período de cura das misturas.

#### **4.3 PLANOS DE RUPTURA NOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL**

Na Figura 42 mostram-se os corpos-de-prova rompidos nos ensaios triaxiais consolidados não drenados.

Os padrões de ruptura podem ser visualizados e bem como o impacto provocado pelo LEC no comportamento do material. Para o tratamento T1, não existe um plano de ruptura definido, o que existem são diversas superfícies de ruptura, característica da plastificação do material quando as deformações caminham para a ruptura. Pela redução na altura do corpo de prova e aumento substancial no diâmetro, ficam evidentes as grandes deformações que um material plástico pode acomodar. No outro extremo, o corpo de prova correspondente ao tratamento T4 exibe um plano de ruptura nitidamente definido, característica de material rígido, com ruptura frágil. Os resultados mostram que a adição de LEC ao solo transforma até mesmo a natureza do material, o qual passa de comportamento elasto-plástico para comportamento puramente elástico, e parece que a dosagem 17,5 % é a fronteira definidora desses comportamentos.



**Figura 42** - Imagem dos corpos-de-prova rompidos após a compressão triaxial.

## 5 CONCLUSÕES

Nas condições de realização deste experimento, é possível concluir que:

- As curvas granulométricas mostraram efeito de agregação das partículas mais finas promovida pelo cálcio presente no lodo, tornando mais grossas as frações texturais nos compósitos.
- A incorporação do reforço ao solo deslocou as curvas de compactação para baixo e para a direita, achatando-as, portanto ampliando a faixa de trabalho em relação à umidade no campo, porém atingindo menores densidades.
- A retração foi reduzida drasticamente até 29% do reforço, a partir do qual sofreu ligeiro acréscimo.
- O módulo de elasticidade aumentou consistente e linearmente com os teores de lodo nos ensaios triaxiais consolidados não drenados. Ocorreu também incremento no módulo de elasticidade com a tensão confinante.
- Os coeficientes angulares das curvas variaram de 0,15 a 0,17, mostrando uma relação muito consistente entre os parâmetros avaliados.
- O módulo aumentou acentuadamente de forma linear com os tratamentos até a dosagem 17,5%, a partir da qual sofre ligeiro incremento, mas ainda linear, definindo assim duas regiões bem distintas de comportamento, uma de escoamento viscoplástico e outra de comportamento rígido elástico.
- O coeficiente de Poisson foi praticamente constante, com valor médio de 0,51 e desvio padrão de 0,002841.
- A tensão axial na ruptura também foi drasticamente afetada pelo reforço e pelo confinamento, passando de 144,07 kPa no solo in

natura para 928,76 kPa com 43%. O comportamento mostrou-se relação linear.

- Os planos de ruptura observados nos corpos de prova dos ensaios triaxiais corroboram a hipótese de que o lodo alterou substancialmente a natureza e o comportamento do compósito.
- No solo in natura e com menores dosagens, o comportamento mecânico mostrou-se plástico, com escoamento; com dosagens mais altas de lodo no compósito, o comportamento passou a ser elástico, característico de corpos rígidos. O tratamento correspondente a 17,5% de lodo parece ser a fronteira entre esses comportamentos.

Esses resultados possibilitam a continuidade da pesquisa na ciência dos materiais no desenvolvimento de novo produto que contribuiria para retirar do ambiente um resíduo contaminante e transformá-lo em material com condições de aplicação para melhoramento do desempenho mecânico do solo, produzindo um compósito por prensagem e regulagem da umidade que substituiriam produtos da indústria da cerâmica vermelha. Outras aplicações do resultado dessa pesquisa poderia ser o apoio ao combate à erosão e reforço de bases de estradas, entre outras aplicações do compósito resultante melhorando as propriedades de engenharia do solo.



## REFERÊNCIAS

ALEM, S. P. **Tratamento de esgoto e geração de lodo**. São Paulo: SABESP, 2001.

ALEM, S. P.; KATO, M. T. **Análise crítica do uso do processo anaeróbio para o tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, 1999.

ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; MADER NETTO, O. S. **Desidratação do lodo aeróbio e séptico através do uso de centrífuga tipo decanter, com e sem o uso de polieletrólitos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001. p. 1-7.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S. **Gestão pública do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna - SP: EMBRAPA, 2000. p. 281-312.

ANGLIAN, W. **Manual of good practice for utilization of sewage sludge in agriculture**. New York: Cambridgeshire, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004a. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13600**: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 graus Celsius. Rio de Janeiro, 1996a. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986a. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984b. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986b. 10 p.

AZEVEDO NETTO, J. M.; BOTELHO, M. H. C. **Manual de Saneamento de cidades e edificações**. São Paulo: Pini, 1991.

BARROS, A. J. P. **Fundamentos de metodologia**: um guia para a iniciação científica. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1986.

BERTON, R. S. Riscos de contaminação do agrossistema com metais pesados. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna - SP: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 259-268.

BOEIRA, R. C.; SOUZA, M. D. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio, pH e densidade de um Latossolo após três aplicações de lodos de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa (MG), v. 31, n. 3, p. 581-590, mai. 2007.

CAMPOS, J. R. **Alternativas para tratamento de esgotos**. Pré-tratamento de águas para abastecimento. Consórcio intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Americana. Piracicaba - SP: Prefeitura Municipal de Piracicaba, 1994.

CANTELE, B. R. **História dinâmica antiga e medieval**. São Paulo: IBEP, 1989.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CASTRO, A. A.; COSTA, A. M. L.M; CHERNICHARO, C. A. L *et al.* **Manual de saneamento e proteção ambiental para os municípios, vol. II**. 4. ed. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007.

CERNICA, J. N. **Geotechnical Engineering**. Soil Mechanics. New Jersey: John Wiley & Sons, 1995.

COSTA, O. P; LOLLO, J. A. Comportamento contrátil de barreiras selantes de solo estabilizado para base de lagoas de tratamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande (PB), v. 11, n. 1, p. 115-120, fev. 2007.

DALLACORT, L. J. *et al.* Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande (PB), v. 11, n. 3, p. 511-518, dez. 2002.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007. p. 302.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. p. 212.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Health effects of land application of municipal sludge**. Washington: USEPA, 1995. p. 257, 403-503.

FANG, H. Y. Foundation Engineering Handbook. In: FERREIRA, R. C. **Desempenho físico-mecânico de solo argiloso estabilizado com cal e silicato de sódio visando aplicação em construções rurais**, Campinas, set. 2005. Disponível em: <[http://64.233.169.104/search?q=cache:uqZr1qO0DzcJ:200.137.202.4/pat/pat35\(3\)-09.pdf+FANG%2Bestabiliza%C3%A7%C3%A3o%2Bsolo&hl=pt-BR&ct=clnk&cd=1&gl=br](http://64.233.169.104/search?q=cache:uqZr1qO0DzcJ:200.137.202.4/pat/pat35(3)-09.pdf+FANG%2Bestabiliza%C3%A7%C3%A3o%2Bsolo&hl=pt-BR&ct=clnk&cd=1&gl=br)>. Acesso em: 29 mai. 2008.

FORTES, R. M. **Classificação dos solos**. Disponível em: <[http://meusite.mackenzie.com.br/rmfortes/estradas2/2\\_CLASSIFICACAO\\_DE\\_SOLOS.pdf](http://meusite.mackenzie.com.br/rmfortes/estradas2/2_CLASSIFICACAO_DE_SOLOS.pdf)>. Acesso em: 18 mai 2008.

FRANÇA, F. C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto RBI Grade 81**. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG) 2003.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley, 1993. p. 517.

GUIMARÃES, A. C. **Estudo de deformação permanente em solos e a teoria do *shakedown* aplicada a pavimentos flexíveis**. 2001. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

GUIMARÃES, J. E. Notas introdutórias. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DE CAL, 6., 1980, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Produtores de Cal, 1980. p. 191-198.

GUTIERREZ, N. H. M.; KRÜGER, C. A.; NÓBREGA, M. T. Efeitos da adição de cal e cimento nas propriedades físicas e mecânicas de um solo argiloso laterítico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DO SOLO E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: ABMS, 1998. p. 160-166.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Earth construction: a compressive guide**. London: Intermediate Technology Publications, 1994. p. 362.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba - SP: Agronômica Ceres, 1985. p. 492.

LEBERT, M.; HORN, R. **A method to predict the mechanical strength of agricultural soils**. Soil Tillage Research. Amsterdam: Elsevier, 1991. p. 575-286.

McKYES, E. *et al.* Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soils. **Soil Till. Res.**, Québec, v. 29, p. 357-366, 1994.

MENDONÇA, A. A. *et al.* A cura acelerada de misturas sol-cal em estudo de caso de dois solos de Viçosa. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 1996, Salvador. **Anais...** Rio de Janeiro: Abpv, 1996. p. 425-432.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. New York: John Wiley, 1976. p. 422.

MULLINS, C.E.; BENGHOUGH, A.G. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, n.3, p. 341-358, set. 1990.

NÓBREGA, M. T. **As reações dos argilos-minerais com a cal**. São Paulo: Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 1985.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995. p. 378.

PITTA, M. R. **Estudo técnico 53**: dosagem de solo melhorado com cimento. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1983.

SABBATINI, F. H. **As fissuras com origem na interação vedação-estrutura**. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA E GESTÃO NA PRODUÇÃO DE

EDIFÍCIOS, 1., 1998. São Paulo. **Anais...** São Paulo: EDUSP, 1998. p. 169-186.

SANEPAR. **Perfil da Companhia.** Disponível em: [http://www.sanepar.com.br/sanepar/calandrakbx/calandra.nsf/0/3BE380D95B817EF583257020005F887D?OpenDocument&pub=T&proj=InternetSanepar&sec=Internet\\_ASanepar](http://www.sanepar.com.br/sanepar/calandrakbx/calandra.nsf/0/3BE380D95B817EF583257020005F887D?OpenDocument&pub=T&proj=InternetSanepar&sec=Internet_ASanepar). Acesso em: 25 abr. 2008.

SANEPAR. GECIP. **Relatório da Área Operacional das ETEs.** Curitiba: Sanepar, 2002.

SANEPAR. PROSAB. **Reciclagem agrícola de lodo de esgoto.** Curitiba: SANEPAR, 1999.

SANEPAR. **Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná.** Curitiba: SANEPAR, 1997.

SEWAGE SLUDGE DISPOSAL. **Journal of the Institution of Water Environmental Management,** New York, v. 3, p. 208-211, 1989.

SILVA, P. F.; PITTA, A. C. **A importância da retração hidráulica na durabilidade das estruturas de concreto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42., Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: IBRACON, 2000. p. 165-179.

SILVA, A. J. N; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo,** Viçosa, v. 31, n. 5, 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100\\_068320070005000003&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100_068320070005000003&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 02 set 2008.

SOUZA PINTO, C. **Curso básico de mecânica dos solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização.** Belo Horizonte : DESA-UFGM, 1996.

THOMPSON, M.R. Engineering properties of lime-soil mixtures. University of Illinois: Urbana Paper, 1967.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos.** São Paulo: EDUSP, 1977.

WALCOTT, J. **Sewage Sludge: Resource or Pollutant?** In: Australian Agronomy Conference, 8, Queen Victoria, 1996.

WEBER, P.S. ETE Ouro Verde. In: FÓRUM GLOBAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS, 1., Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SANEPAR, 2008.

WOOD, D. M. **Soil behaviour and critical state soil mechanics.** Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 462 p.

# 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](#)