

**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MARIA CÉLIA ALVES FEITOSA

LODO DE ESGOTO: ALGUMAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA

ORIENTADORES:

Prof. Dr. Sílvio Romero de Melo Ferreira

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira

Recife

2009

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

Maria Célia Alves Feitosa

LODO DE ESGOTO: ALGUMAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA

Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial, exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração em Materiais de Construção, orientada pelos Professores Sílvio Romero de Melo Ferreira e Joaquim Teodoro Romão de Oliveira.

Recife

2009

F3111 Feitosa, Maria Célia Alves
Lodo de esgoto : algumas aplicações em engenharia / Maria
Célia Alves Feitosa ; orientadores Silvio Romero de Melo Ferreira,
Joaquim Teodoro Romão de Oliveira, 2009.
120 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco.
Pró-reitoria Acadêmica. Coordenação de Pós-graduação. Mestrado
em Engenharia Civil, 2009.

1. Materiais de construção. 2.Lodo de esgoto. 3. Solos. I. Título.

CDU 691

Maria Célia Alves Feitosa

LODO DE ESGOTO: ALGUMAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração em Engenharia das Construções.

Aprovada por:

Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira
Orientador

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de
Oliveira
Co - Orientador

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira
Examinador Interno

Prof^a. Dr^a. Maria Cristina Moreira Alves
Examinadora Externa

Recife

2009

Dedico esta dissertação aos meus pais João (In Memória) e Natalice que sempre orientaram, incentivaram e lutaram para que os filhos estudassem.

AGRADECIMENTOS

A Deus por mais esta conquista, por me ajudar em meu crescimento profissional, por ter colocado pessoas maravilhosas em meu caminho durante esta trajetória.

A minha família pela compreensão, confiança e estímulo para que eu chegasse tão longe.

Aos meus Professores e Orientadores Silvio Romero de Melo Ferreira e Joaquim Teodoro Romão de Oliveira, pela amizade, paciência, orientação, apoio e contribuições valiosas em todas as etapas deste trabalho.

À Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), pela bolsa de estudos e em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelo apoio e receptividade.

À Rede CCI/FIUC pela oportunidade de desenvolver parte do trabalho de pesquisa (Formação de técnicos para melhorar a qualidade de solos em países em desenvolvimento).

A todos os professores do mestrado Antonio Oscar da Fonte, Eliana Cristina Barreto Monteiro, Fernando Artur Nogueira Silva, Maria da Graça de Vasconcelos Xavier Ferreira, Paulo Roberto do Lago Helene, Romilde Almeida Oliveira.

À Professora Arminda Sacconi, pela presteza em conseguir o material dos ensaios.

Ao Engenheiro Otacílio Cantarelli pela presteza e gentileza com que sempre me atendeu.

À TECOMAT, pela gentileza de realizar a retificação dos corpos-de-prova de concreto em seu laboratório.

Ao laboratório de Análises químicas da UNICAP, na pessoa do Prof. Sergio Paiva pela realização das análises químicas.

Aos laboratoristas do laboratório de Materiais de Construção da Universidade Católica de Pernambuco, André Miranda e Washington Espósito, pela importante ajuda prestada nos experimentos e ensaios.

Ao laboratorista do laboratório de Topografia, Waldemar de Melo Brito pela presteza constante nos ensaios de solo.

Às funcionárias e amigas da secretaria de Engenharia Civil Luzinete Menezes e Raimunda Ferreira da Silva, sempre dispostas a ajudar no que fosse necessário.

A todos os amigos do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Ângela Cristina, Brunno Onofre e Célia Cavalcante.

Por fim, agradeço aos que de todas as formas contribuíram nesta conquista.

RESUMO

O uso de resíduos pela indústria da construção civil vem se consolidando como prática para a sustentabilidade, atenuando o impacto ambiental gerado pela disposição inadequada de resíduos. Devido às suas características de produção, a indústria da Construção Civil possui uma enorme capacidade para absorver estes resíduos como parte de sua matéria prima. O objetivo deste trabalho é de contribuir com os estudos alternativos do aproveitamento do lodo de esgoto gerados em estações de tratamento no melhoramento do solo colapsível e em substituição parcial do agregado miúdo no concreto. Foram utilizados lodos, já ambientalmente tratados para uso, da Estação de Tratamento Esgoto (ETE) Mangueira nas doses equivalentes a 25, 50 e 75 Mg ha⁻¹ e da ETE Curado nas proporções de 5%, 10% e 15%. Para a caracterização e análise da interação do solo com o lodo e com o cimento foram realizados ensaios físicos, químicos, de microscopia eletrônica de varredura, condutividade hidráulica, mobilidade química, edométricos simples e duplos, resistência à compressão, índice esclerométrico, velocidade ultra-sônica e absorção por capilaridade. Os resultados permitem concluir que a adição de lodo ao solo causa uma redução no índice de vazios, melhora o empacotamento das partículas, reduz a colapsibilidade do solo para um mesmo peso específico aparente seco, mostrando ser um método promissor para o melhoramento de solos colapsíveis. O acréscimo da porcentagem de lodo ao concreto como fração do agregado miúdo, reduz a resistência à compressão e a absorção de água em relação ao concreto de referência com agregado convencional. Os resultados, ainda que preliminares, indicam que o uso do lodo de esgoto, como parte do agregado miúdo ao concreto, mesmo para edificações de pequeno porte, devem ter uso restrito e estudos mais detalhados devem ser realizados.

Palavras – chave: Lodo de esgoto, solo-lodo, concreto, construção civil.

ABSTRACT

The use of building residues has been consolidated as a way to get sustainability in civil construction industry as well as it has provided decreases in environmental impacts that arise from inadequate disposal of such material. Due to its specific production features, building industry has a large field where one can use these residues as raw material. The objective of this work is to contribute with studies about the possibilities of using sewage sludge as a way to improve collapsive soil features and as small size concrete aggregates. Sewage sludge with 25, 50 and 75 Mg ha⁻¹ from Mangueira and Curado Treatment Plants were used with addition of about 5%, 10% and 15%. To obtain the characterization of sewage sludge properties and to analyze its interaction with the soil and the cement of concrete specimens several tests were performed, such as: physical and chemical tests, scanning electron microscopy tests, hydraulic conductivity tests, chemical mobility tests, compression strength tests, sclerometric tests and ultrasonic pulse velocity tests. Obtained results allowed concluding that the addition of sewage sludge in the soil contributed to decrease in its void index, improved its atomic packing factor, reduced its collapsibility to the same apparent specific dry weight showing, this way, that this procedure can be useful to improve collapsible soils performance. It was also observed that when one increases the proportion of sewage sludge in substitution to small size concrete aggregates the compression strength and water absorption decreases when compared to a concrete made with usual aggregates. In spite of being preliminary results, obtained behavior indicates that the use of sewage sludge in substitution to a part of small size concrete aggregate should be used with care, even in small buildings and advanced studies are needed to exploit its use as a building material.

Key works: Sewage Sludge, Soil – Sludge, Concrete, Building Industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Teor de sólidos	28
Figura 2.2 – Decantador - ETE Curado	29
Figura 2.3 – Leito de secagem - ETE Curado	30
Figura 2.4 – ETE Mangueira	36
Figura 2.5 – ETE Curado	39
Figura 2.6 – Fluxograma do processo de agregado leve de lodo	42
Figura 2.7 – Fluxograma do processo CCBA de fabricação de agregado leve	43
Figura 3.1 – Lodo seco – ETE Curado	48
Figura 3.2 –Lodo peneirado – ETE Curado	48
Figura 3.3 – Solo natural	49
Figura 3.4 – Colunas de PVC com amostras do solo natural e com misturas de solo-lodo equivalentes a 25, 50 e 75 Mg ha ⁻¹ - ETE Mangueira	50
Figura 3.5 - Permeâmetro de paredes flexíveis para obtenção da condutividade hidráulica - ETE Mangueira	52
Figura 3.6 - Molde de compactação no início e após a compactação estática dos corpos de prova.	54
Figura 3.7 - Procedimento de moldagem das células edométricas	55
Figura 3.8- Ensaio de abatimento de tronco de cone	60
Figura 3.9 – Ensaio de resistência à compressão	62
Figura 3.10– Ensaio de velocidade ultra- sônica	63
Figura 3.11 – Ensaio de absorção por capilaridade	64
Figura 4.1 – Curvas granulométricas – solo, lodo e misturas solo-lodo com 25, 50 e 75 Mg ha ⁻¹ ETE Mangueira e 5 %, 10 % e 15 % ETE Curado.	67
Figura 4.2 – Curvas de compactação – solo, lodo e misturas solo-lodo com 25, 50 e 75 Mg ha ⁻¹ ETE Mangueira e 5 %, 10 % e 15 % ETE Curado.	68

Figura 4.3 – Curva da porcentagem de lodo versus umidade versus peso específico aparente seco máximo para 25, 50 e 75 Mg ha ⁻¹ ETE Mangueira e 5 %, 10 % e 15 % ETE Curado.	68
Figura 4.4 – Índices físicos do solo natural e das misturas solo-lodo para 25, 50 e 75 Mg ha ⁻¹ - ETE Mangueira.	70
Figura 4.5 – Eletromicrografia da contextura do solo, lodo e das misturas solo-lodo 25, 50 e 75 Mg ha ⁻¹ - ETE Mangueira	71
Figura 4.6 – Condutividade hidráulica do solo e misturas solo-lodo- ETE Mangueira	72
Figura 4.7 – Índice de vazios x tensão vertical de consolidação em ensaios edométrico simples para peso específico aparente seco de 15,00 kN/m ³ - ETE Curado	76
Figura 4.8 – Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação em ensaios edométricos simples para peso específico aparente seco de 15,00 kN/m ³ - ETE Curado.	77
Figura 4.9–Índice de vazios x tensão vertical de consolidação em ensaios edométrico simples para peso específico aparente seco de 17,00 kN/m ³ - ETE Curado	78
Figura 4.10 – Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação em ensaios edométricos simples para peso específico aparente seco de 17,00 kN/m ³ .	79
Figura 4.11– Potencial de colapso x tensão vertical de consolidação em ensaios edométrico simples para peso específico aparente seco de 15,00 kN/m ³ -ETE Curado.	80
Figura 4.12 - Potencial de colapso x tensão vertical de consolidação em ensaios edométrico simples para peso específico aparente seco de 17,00 kN/m ³ - ETE Curado.	81
Figura 4.13 Porcentagem de volume da cada amostra do sólido, lodo, água e ar.	82
Figura 4.14– Índice de vazios x tensão vertical de consolidação em ensaios Edométricos duplos para peso específico aparente seco de 15,00 kN/m ³ - ETE Curado.	84
Figura 4.15 – Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação em ensaios edométricos duplos para peso específico aparente seco de 15,00 kN/m ³ - ETE Curado.	85
Figura 4.16– Índice de vazios x tensão vertical de consolidação em ensaios edométricos duplos para peso específico aparente seco de 17,00 kN/m ³ - ETE Curado.	86
Figura 4.17 – Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação em ensaios edométricos duplos para peso específico aparente seco de 17,00 kN/m ³ .	87
Figura 5.1 – Curvas Granulométricas dos agregados	90

Figura 5.2 - Velocidade ultra -sônica x idade, concreto convencional, com lodo de esgoto e com RCD* ; (a) $a/c = 0,57$; (b) $a/c = 0,65$.	92
Figura 5.3 – Índice esclerométrico x idade, concreto convencional, com lodo de esgoto e com RCD* ; (a) $a/c = 0,57$; (b) $a/c = 0,65$.	93
Figura 5.4 – Resistência à compressão versus idade, concreto convencional, com lodo de esgoto, com RCD* e CLE **; (a) $a/c = 0,57$; (b) $a/c = 0,65$.	95
Figura 5.5 – Absorção por capilaridade versus tempo, com concreto convencional e com lodo de esgoto; (a) $a/c = 0,57$; (b) $a/c = 0,65$.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de pH, Condutividade Elétrica (CE), Cu^{++} , Zn^{++} , Fe^{++} , Cd^{++} do solo e misturas solo-lodo – ETE Mangueira.	37
Tabela 2.2 – Valores médios da análise química dos efluentes coletados com 15, 30, 45 e 60 dias de lixiviação – ETE Mangueira.	37
Tabela 2.3- Análise química do teor de metais presentes no lodo.	40
Tabela 3.1 - Descrição dos ensaios para o solo, lodo e misturas solo-lodo	47
Tabela 3.2: Traço e consumo do concreto por m^3 ($a/c=0,57$)	59
Tabela 3.3: Traço e consumo do concreto por m^3 ($a/c=0,65$)	60
Tabela 3.4: Programa experimental do concreto para relação $a/c = 0,57$ e $a/c = 0,65$	61
Tabela 4.1. Peso específico real dos grãos e frações do solo, lodo e das misturas solo- lodo ETE Mangueira e Curado	66
Tabela 4.2 – Índices físicos do solo, lodo e misturas solo – lodo ETE Mangueira e Curado	67
Tabela 4.3 – Índices físicos do solo, lodo e misturas solo – lodo ETE Mangueira	69
Tabela 4.4. Caracterização química do solo, lodo e da mistura solo-lodo 25, 50 e 75 Mg ha^{-1} ETE Mangueira.	73
Tabela 4.5 - Caracterização química do solo, lodo e da mistura solo-lodo – 5 %, 10 % e 15 % - ETE Curado	74
Tabela 4.6 - Potenciais de colapso dos ensaios edométricos simples ($\gamma_s = 15,00 \text{ kN/m}^3$ e $\gamma_s = 17,00 \text{ kN/m}^3$ - ETE Curado.	80
Tabela 4.7 – Porcentagem de volume de cada componente da mistura	82
Tabela 4.8 – Coeficientes e Parâmetros dos ensaios Edométricos duplos com amostras de solo e misturas solo-lodo com peso específico seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$.	88
Tabela 4.9 – Coeficientes e Parâmetros dos ensaios Edométricos duplos com amostras de solo e misturas solo-lodo com peso específico seco de $17,00 \text{ kN/m}^3$.	88
Tabela 5.1– Valores da velocidade da onda ultra-sônica	91
Tabela 5.2 – Classificação da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação da onda ultra - sônica	92

Tabela 5.3 - Valores da velocidade da onda ultra-sônica	93
Tabela 5.4 – Valores da resistência à compressão	94
Tabela 5.5 – Resultado dos ensaios de absorção capilar após 72 horas	96
Tabela 5.6 - Valores da absorção por capilaridade	96

LISTA DE ABREVIATURAS

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental

ABNT– Associação Brasileira de Normas Técnicas

ALL – Agregado leve de lodo

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CLE – Cinzas de lodo de esgoto

COMPESA – Companhia Pernambucana de Saneamento

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO – Demanda Bioquímica de oxigênio

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FIUC – Federação Internacional das Universidades Católicas

IPA - Instituto Agrônomo de Pernambuco

IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológica/SP

LE – Lodo de Esgoto

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MUE – Máquina Universal de Ensaio

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

SABESP – Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná

UASB – Reator anaeróbio de fluxo ascendente de manta de lodo

UNICAP – Universidade Católica de Pernambuco

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações	
Lista de Tabelas	
Lista de Abreviaturas	
CAPÍTULO 1	18
INTRODUÇÃO	18
1.1 Justificativa e Relevância	18
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos	20
1.3 Estrutura da dissertação	20
CAPÍTULO 2	22
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Classificação das águas de esgotamento	22
2.2 Sistemas de esgoto	22
2.3 Evolução dos sistemas de esgoto	22
2.4 Esgotamento sanitário	24
2.4.2 Tratamento dos esgotos	24
2.4.2.1 Tratamento da fase líquida	25
2.4.2.2 Tratamento da fase sólida	27
2.5 Legislação vigente	34
2.6 Processo de tratamento das Estações de Tratamento de Esgotos da Mangueira e Curado	35

2.7 Aplicação do lodo de esgoto na indústria da construção civil	39
CAPÍTULO 3	47
MATERIAS E MÉTODOS	47
3.1 Programa experimental: solo, lodo e misturas solo – lodo	47
3.2. Preparação das amostras de solo e da mistura solo-lodo	48
3.3 Métodos dos Ensaio	49
3.3.1 Caracterização Física	49
3.3.2 Ensaio de Mobilidade Química	50
3.3.3 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura	51
3.3.4 Ensaio de Condutividade Hidráulica	51
3.3.5 Ensaio Edométrico Duplo e Simples	53
3.3.6 Caracterização química do solo, lodo e misturas solo-lodo	56
3.4 Utilização do lodo de Esgoto como agregado miúdo em Concreto	58
3.4.1 Dosagem do concreto	59
3.4.2 Moldagem dos corpos-de-prova	60
3.4.3 Realização dos ensaios	60
3.4.3.1 Ensaio de Resistência à Compressão	61
3.4.3.2 Ensaio de Esclerometria	62
3.4.3.3 Ensaio de Velocidade ultra – sônica	62
3.2.4.4 Absorção por capilaridade	62
3. 4.3.4 Ensaio de Absorção por capilaridade	63
CAPÍTULO 4	65
RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 Caracterização física do solo, dos lodos e das misturas solo-lodo	65
4.2 Ensaio de Mobilidade Química do solo e das misturas solo-lodo ETE Mangueira	69
4.3 Análise Micro estrutural do solo e da mistura solo-lodo - ETE Mangueira	70

4.4 Condutividade Hidráulica	71
4.5 Caracterização química do solo, lodo e da mistura solo-lodo	72
4.6 Análise da Compressibilidade	74
4.6.1 Ensaio Edométrico	75
4.6.1.1 Ensaio Edométrico Simples	75
4.6.1.2 Ensaio Edométrico Duplo	83
CAPÍTULO 5	90
APLICAÇÕES DO LODO EM CONCRETO	90
5.1 Concreto com Agregado Convencional e Agregado de Solo-Lodo	90
5.1.1 Caracterização física do agregado miúdo e graúdo	90
5.1.2 Características dos corpos-de-prova	91
5.1.3 Velocidade Ultra-Sônica	91
5.1.4 Índice Esclerométrico	92
5.1.5 Resistência à Compressão	94
5.1.6 Absorção por Capilaridade	95
CAPÍTULO 6	97
CONCLUSÕES	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
APÊNDICE A - Tabelas dos Índices Físicos Iniciais e Finais no Solo e Solo-Lodo Edométrico Simples e Duplos	107
APÊNDICE B – Tabelas e Figuras da Caracterização Física e Mecânica dos corpos-de-Prova	112

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e Relevância

Um dos maiores problemas ambientais a serem enfrentados pela humanidade neste século, é a grande quantidade de resíduos gerados nos centros urbanos. Os resíduos sólidos e líquidos urbanos (lixo, resíduos de ETE e de tratamento industrial), muitas vezes acumulados no ambiente sem o adequado tratamento ou utilização que possibilite sua reciclagem, tornaram-se dentre outros, agentes causadores da poluição nas grandes áreas urbanas (GEYER, 2001). Não tendo destino certo, partes destes resíduos acabam sendo encaminhadas aos aterros sanitários urbanos quando estes têm capacidade.

Como o desenvolvimento sustentável é a única alternativa de se conceber a sobrevivência do planeta, levando em consideração o desenvolvimento tecnológico e as condições necessárias à continuidade da vida, foram criadas leis de proteção ambiental com relação à gestão de lodos e resíduos.

Nas grandes cidades, a legislação ambiental restringe cada vez mais a disposição do lodo em aterros, como também à escassez de locais adequados e os altos custos. Sendo então necessário, o desenvolvimento e a implementação de alternativas que substituam de maneira eficiente o simples descarte desses resíduos em aterros (SANTOS 2003).

A Agenda 21 na Conferência Mundial do Meio Ambiente – Rio 92, de acordo com Fernandes (1999) reconhece a importância da destinação destes resíduos, quando incluiu no capítulo 21 o tema “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos e questões relacionadas com esgotos” definindo quatro programas como sendo prioritários: a redução da produção de resíduos, o aumento ao máximo de reutilização e reciclagem, a promoção de depósitos e tratamento ambientalmente saudável e a ampliação do alcance dos serviços que se ocupam com resíduos.

No Brasil, o ministério do Meio Ambiente estima que cerca de 10% dos esgotos urbanos são tratados nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) antes de serem lançados aos rios. Deste tratamento resulta a produção de um lodo rico em matéria orgânica e em nutrientes, denominado de lodo de esgoto, cuja disposição final é problemática, chegando a representar 60 % do custo de operação das estações de tratamento (CAMARGO; BETTIOL, 2000).

A disposição final inadequada deste resíduo anula parcialmente os benefícios da coleta e tratamento dos efluentes. Portanto, um destino adequado deve ser dado a esse resíduo e, para tal, vêm sendo realizados diversos estudos no sentido de reciclar este resíduo como matéria – prima para produção de outros materiais.

A busca de soluções economicamente e ambientalmente vantajosas para os diversos tipos de resíduos sólidos gerados continua sendo um desafio, e entre eles a disposição final do lodo de esgoto. É neste contexto que este trabalho busca alternativas capazes de auxiliar na discussão da gestão da disposição final do lodo de esgoto através de sua reciclagem e emprego na fabricação de materiais de construção civil como agregado leve e no melhoramento de solos.

Esta dissertação é resultado dos desdobramentos de um Projeto de Pesquisa intitulado “Uso do Lodo de Esgoto em Plantas Condimentares e Medicinais na Zona da Mata do Estado de Pernambuco, Brasil”, financiado pela Federação Internacional das Universidades Católica – (FIUC).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem por objetivo estudar a caracterização física, química e mecânica de um solo e da amostra solo-lodo com diferentes proporções para uso no melhoramento de solos colapsíveis e a potencialidade da utilização como agregado leve no concreto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização físico-química do solo e do lodo de esgoto de 2 (duas) Estações de Tratamento Esgoto da Região Metropolitana do Recife – RMR. Estação de Tratamento de Mangueira e Estação de Tratamento do Curado.
- Estudar a interação físico-químico de um solo arenoso com lodo de esgoto, em diferentes proporções.
- Avaliar os efeitos de diferentes proporções de lodo de esgoto, na mistura para uso em concreto, como agregado e comparar com resultados de outras pesquisas.
- Verificar as possíveis aplicações do lodo de esgoto na Engenharia Civil para melhoramento do solo e como agregado leve ao concreto.

1.3 Estrutura da dissertação

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

Neste Capítulo 1, como já apresentado, consta a introdução, os objetivos da pesquisa e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica sobre o sistema de esgotamento sanitário abordando desde a geração dos esgotos até o seu tratamento e disposição final, além de uso na construção civil.

O Capítulo 3 é a descrição dos programas experimentais da pesquisa e metodologia adotada para realização dos ensaios.

O Capítulo 4 apresenta a análise e interpretação dos resultados obtidos por meio dos ensaios de laboratório.

O Capítulo 5 apresenta a análise e interpretação dos resultados dos corpos-de-prova de concreto obtidos por meio dos ensaios de laboratório.

O Capítulo 6 apresenta o resumo das principais conclusões da dissertação e são sugeridas linhas de investigação para o desenvolvimento de novas pesquisas.

Ao final apresentam-se as referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Classificação das águas de esgotamento

A expansão demográfica e o desenvolvimento tecnológico trazem como consequência imediata o aumento de consumo de água e a ampliação constante do volume de águas residuais. Essas águas, conjuntamente com as de escoamento superficial e de possíveis drenagens subterrâneas, formarão as vazões de esgotamento ou simplesmente esgotos. De acordo com sua origem, os esgotos podem ser classificados em esgoto sanitário ou doméstico, que tem origem na vazão correspondente ao desempenho das atividades domésticas, esgoto industrial que é gerado através das atividades industriais e o esgoto pluvial que tem sua vazão gerada a partir da coleta de águas de escoamento superficial originada das chuvas e, em alguns casos, lavagem das ruas e de drenos subterrâneos (AZEVEDO NETTO, 1977).

2.2 Sistemas de Esgotos

Segundo Pera (1977), denomina-se sistema de esgoto um conjunto estrutural que compreende canalizações coletoras funcionando por gravidade, unidades de tratamento e de recalque quando imprescindíveis, obras de transporte e de lançamento final, além de uma série de órgãos acessórios indispensáveis para que o sistema funcione e seja operado com eficiência, rapidez e segurança. Sendo chamado de rede coletora um conjunto de condutos e obras destinadas a coletar e transportar as vazões para um determinado local, ou seja, a rede coletora é apenas um componente do sistema de esgotamento.

2.3 Evolução dos Sistemas de Esgotamento

Segundo Azevedo Netto (1984), a coleta das águas servidas já era uma preocupação das civilizações antigas. Em 3750 a.C., eram construídas galerias de esgoto em Nípur (Índia) e na Babilônia. E em 3100 a. C., já existiam banheiros com esgotos canalizados em manilhas cerâmicas rejuntadas com gesso.

No final do século XII, foi retomada a construção de sistemas de drenagem pública de águas de escoamento superficial e o encanamento subterrâneo de águas servidas, inicialmente para fossas domésticas e posteriormente para os canais pluviais. E a partir do século XIV, tiveram origem as primeiras leis públicas sobre a instalação, controle e uso destes serviços, (METCALF; EDDY, 1977).

O destino dos esgotos e do lixo urbano, já era considerado um problema a partir do século XVI, com a crescente poluição dos mananciais de água. Com o desenvolvimento do abastecimento de água passou-se a empregar o sistema de bombeamento com máquinas movidas a vapor e a utilização de tubos de ferro para recalcar a água, (AZEVEDO NETTO, 1984).

No final do século XVII, as mudanças agrárias e a revolução industrial provocaram profundas alterações na vida das cidades e, conseqüentemente, nas instalações sanitárias. A distribuição de água e as descargas hídricas para evacuar o esgoto, provocaram a saturação do solo, contaminando as ruas e o lençol freático. Primeiramente, algumas cidades tentaram o emprego de fossas individuais, que sem manutenção adequada tornaram-se fontes de geração de doenças, (AZEVEDO NETTO, 1984).

As décadas de 1830 a 1840 podem ser destacadas como as mais importantes na história da Engenharia Sanitária. Em 1847, tornou-se compulsório o lançamento de todas as águas residuárias nas galerias públicas. Assim foi que surgiu o sistema unitário de esgotamento. O sistema separador absoluto foi inventado mais tarde, em 1879, e aplicado pela primeira vez na cidade de Memphis, Tennessee, Estados Unidos, (AZEVEDO NETTO, 1977).

No Brasil, graças ao trabalho de Saturnino de Brito e de outros engenheiros, a partir de 1912 generalizou-se o sistema separador absoluto.

O desenvolvimento científico e tecnológico da humanidade fez com que o homem tomasse consciência da necessidade de criar sistemas eficazes de saneamento onde se garantisse o abastecimento da água potável e recolhimento das águas residuárias, bem como condições favoráveis de reciclagem na natureza.

2.4 Esgotamento Sanitário

No Brasil, o sistema de coleta e transporte coletivo dos esgotos não inclui as águas pluviais, pois se utiliza o sistema separador absoluto de esgotamento sanitário. São partes constitutivas desse sistema a coleta e o transporte de esgotos, o tratamento e a disposição final.

2.4.1 Coleta e Transporte de Esgotos

Os esgotos coletados são conduzidos por meio de tubulações às Estações de Tratamento de Esgotos (ETE). Normalmente, funcionam como condutos livres, podendo também funcionar como conduto forçado em alguns trechos. Os esgotos são coletados e transportados a partir das edificações que conduzem o efluente até a rede coletora através de ramais prediais. Através de coletores secundários, esses esgotos são lançados na rede coletora que os encaminha ao coletor tronco que recebe estas contribuições e transporta-os para um interceptor ou emissário (FONTES, 2003).

2.4.2 Tratamento dos esgotos

De acordo com Pergorini et al. (2003), aproximadamente 40% da população brasileira dispõe de coleta de esgotos, e apenas cerca de 10% do esgoto coletado sofre algum processo de tratamento.

O esgoto sanitário é constituído de 99,9 % de água e 0,1 % de sólidos totais (orgânicos e inorgânicos; suspensos e dissolvidos), além de microorganismos. Devido a este 0,1 % de sólidos presentes no esgoto, é necessário tratá-lo. (TSUTIYA; HIRATA, 2001, VON SPERLING, 1996a).

O tratamento dos esgotos pode ser dividido em duas fases: fase líquida e fase sólida. A fase líquida pode ser composta por esgotos domésticos, esgoto industrial e esgoto pluvial. A fase sólida é composta por subprodutos gerados durante o tratamento da fase líquida (FONTES, 2003).

Os níveis de tratamento, bem como sua eficiência, delimitam a remoção dos poluentes de maneira a adequar o lançamento a uma qualidade desejada.

2.4.2.1 Tratamento da fase líquida

Os níveis de tratamento na fase líquida, segundo Von Sperling (1996a), são: preliminar, primário, secundário e, eventualmente, terciário. A seguir são resumidos estes níveis de tratamento:

- Preliminar: constitui-se na remoção de sólidos em suspensão grosseiros (materiais de maiores dimensões e areia). A remoção dos sólidos grosseiros é feita, normalmente, por meio de grades e a areia é removida através de unidades denominadas de caixa de areia ou desarenador;
- Primário: remove parte dos sólidos em suspensão sedimentáveis e parte da matéria orgânica, utiliza-se opções físicas como peneiramento e sedimentação, reduzindo a matéria orgânica no efluente. Os esgotos fluem vagarosamente pelos decantadores, permitindo com isto que os sólidos de maior densidade sedimentem gradualmente no fundo, formando o lodo primário bruto com materiais flutuantes como graxas e óleos, de menor densidade.
- Secundário: se processa principalmente a remoção de sólidos em suspensão e dissolvidos e matéria orgânica sedimentável e, eventualmente, nutrientes como nitrogênio e fósforo. São utilizados principalmente os processos de tratamento como sistemas de lagoas de estabilização, sistemas de lodo ativados e sistemas aeróbios com biofilmes.

Destacam-se os principais sistemas de tratamento de esgoto em níveis secundário:

a) Sistemas de lagoas de estabilização

É um sistema de tratamento de esgoto muito utilizado no Brasil devido ao seu baixo custo, simplicidade operacional e às condições climáticas. E pode ser realizado de quatro maneiras diferentes.

Lagoa Facultativa: Neste tipo de sistema, a DBO (demanda bioquímica de oxigênio) solúvel e finamente particulada é estabilizada anaerobicamente por bactérias dispersas no meio líquido, ao passo que a DBO suspensa é estabilizada por bactérias no fundo da lagoa.

Lagoa Anaeróbia: A DBO é em torno de 50% estabilizada nesta lagoa, que é mais profunda e com maior volume, enquanto a DBO restante é removida pela lagoa facultativa. A lagoa anaeróbia possui profundidade em torno de 4,5 m e reduzida área superficial.

Lagoa Aerada Facultativa: Os mecanismos de remoção de DBO são similares aos de uma lagoa facultativa. Neste sistema o oxigênio é fornecido por aeradores mecânicos, ao invés de fotossíntese.

Lagoa Aerada de mistura complexa – Lagoa facultativa: A energia introduzida por unidade de volume da lagoa é elevada, o que faz com que os sólidos, principalmente a biomassa, permaneça dispersa no meio líquido, ou em mistura completa. A decorrente maior concentração de bactérias no meio líquido aumenta a eficiência do sistema de remoção da DBO, o que permite que a lagoa tenha um volume inferior ao de uma lagoa facultativa.

Lagoa Aerada de mistura complexa – Lagoa aerada: Lagoa similar a do sistema anterior, com a diferença de que a unidade de decantação é constituída por uma lagoa de menores dimensões, onde o lodo deve ser retirado em períodos não superiores a 5 anos.

b) Sistemas de Lodos Ativados

Tipo de sistema de tratamento de esgoto sanitário por lodos ativados que tem sido cada vez mais utilizado, principalmente em grandes centros urbanos, pois permite com pequenas áreas se tratar grandes quantidades de esgoto. Pode ser executado de três formas (ANDREOLI, et al., 1999), quais sejam:

Lodos ativados convencional: É composto por decantador primário, tanque de aeração, decantador secundário, adensador de lodo, digestor anaeróbio e desaguamento de lodo. A concentração de biomassa no reator é bastante elevada, devido a recirculação dos sólidos (bactérias) sedimentados no fundo do decantador secundário. A biomassa permanece no sistema mais tempo do que o líquido o que garante elevada eficiência na remoção da DBO.

Lodos ativados por aeração prolongada: Similar ao sistema convencional, com a diferença que a biomassa permanece mais tempo no sistema, sendo necessário para tanto, os tanques de

aeração maiores. Com isto, há menos DBO disponível para as bactérias, o que faz com que elas se utilizem de matéria orgânica do próprio material celular para a sua manutenção.

Lodos ativados de fluxo intermitente: A operação do sistema é intermitente. Ocorre no mesmo tanque, em fases distintas, as etapas de reação e sedimentação, onde os aeradores são ligados e desligados, respectivamente. Sendo os reatores desligados, os sólidos sedimentam-se ocasião em que se retira o efluente (sobrenadante). Ao se religar os aeradores, os sólidos sedimentados retornam a massa líquida, o que dispensa as elevatórias de recirculação. Neste método não existe decantadores secundários.

c) Sistemas de Filtro Biológico

A estabilização da matéria orgânica é realizada por bactérias que são aderidas a um suporte de pedras ou materiais sintéticos. A eliminação de patogênicos fica entre 60-90% (LESSA, 2005)

d) Sistema anaeróbio simplificado: Constitui-se em um sistema similar ao filtro anaeróbio.

e) Sistema de disposição no solo: É um sistema simplificado que requer áreas extensas. Esse método não é utilizado devido às grandes implicações ambientais, contaminação de águas superficiais e subterrâneas, vegetação, etc.

Terciário: Este nível de tratamento é pouco aplicado devido principalmente ao seu alto custo de implantação, embora já venha sendo utilizado em alguns países desenvolvidos. Consiste em maior eficiência na remoção de nutrientes, patogênicos, compostos não biodegradáveis, metais pesados, sólidos inorgânicos dissolvidos e sólidos em suspensão remanescentes.

2.4.2.2 Tratamento da Fase Sólida

O lodo gerado na estação de tratamento de esgoto, apesar de não ser o único subproduto é o de maior importância, por ser um resíduo de difícil tratamento e disposição final, face às grandes quantidades que são geradas, à dificuldade em se encontrar locais adequados para a sua disposição final, à distância de transporte e os impactos ambientais, entre outros (JORDÃO; PESSÔA, 1995). Apesar de possuir mais de 95% de água, por convenção o lodo é denominado de fase sólida (ANDREOLI et al., 2001a).

No tratamento do lodo, as principais etapas são: adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento, higienização e disposição final. O que determina quais as etapas que serão implantadas ou não, são as características do lodo a ser gerado e o produto final que se deseja obter, além dos custos. Os custos representam em torno de 20 a 60 % do total gasto com a operação de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ANDREOLI et al., 2001a; FERNANDES, 1999; TSUTIYA ; HIRATA, 2001).

O lodo é composto por água e sólidos. Os sólidos dividem-se em sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos, sendo maioria os primeiros. Quanto à matéria orgânica, os sólidos se dividem em sólidos fixos ou inorgânicos e sólidos voláteis ou orgânicos, Figura 2.1. O teor de sólidos é considerado por vários autores como sendo o teor de sólidos totais ou teor de sólidos secos (ANDREOLI et al., 2001a). Sendo a relação sólidos voláteis / sólidos totais, uma boa indicação do teor de matéria orgânica no lodo.

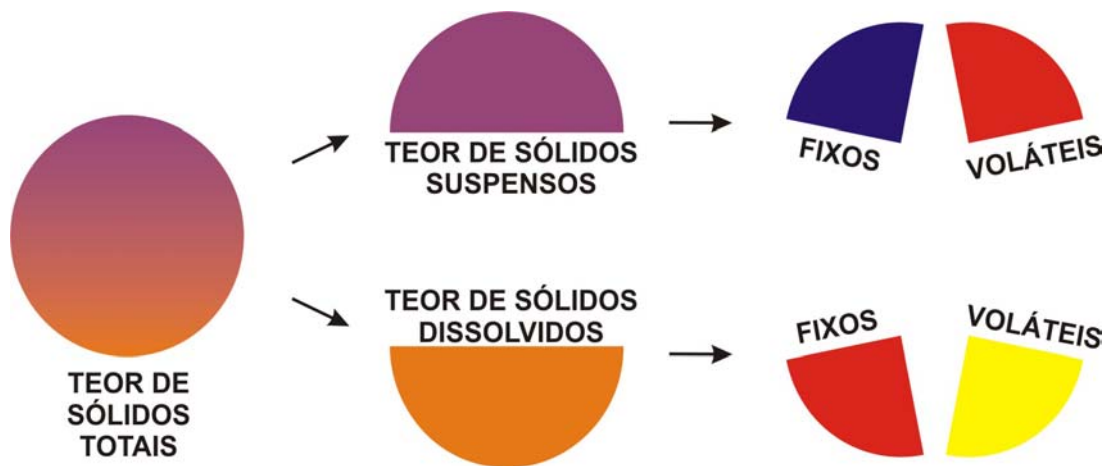


Figura 2.1 – Teor de sólidos (adaptado de FONTES, 2003).

a) Adensamento do lodo

O adensamento ou espessamento é um processo físico de concentração de sólidos que tem como objetivo a redução da umidade e conseqüentemente do volume do lodo, o que por sua vez facilita as unidades seguintes, por se tornarem mais compactas em função da redução do volume. Os tipos de adensadores de lodo mais utilizados são os adensadores por gravidade e os adensadores por flotação (TSUTIYA; HIRATA, 2001).

- Adensadores por gravidade

A eficiência dessas unidades é maior quando utilizam o lodo proveniente de tratamento primário. São unidades semelhantes a um decantador primário, no qual o lodo sedimenta e adensa no fundo do tanque, sendo removido por raspadores e encaminhado para a etapa de estabilização, Figura 2.2.



Figura 2.2 Decantador – Estação de Tratamento de Esgotos - ETE Curado.

- Adensadores por flotação

Este processo consiste na injeção de bolhas de ar no meio líquido. Estas bolhas aderem às partículas sólidas, fazendo com que a sua densidade diminua e as mesmas sejam arrastadas para a superfície, onde são removidas por raspadores (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

b) Estabilização do lodo

A estabilização visa remover patógenos, facilitar a desidratação e evitar a emissão de maus odores no processo de tratamento do lodo, através da matéria orgânica biodegradável. Podendo ser feita através de três processos: estabilização biológica, estabilização química e estabilização térmica. A mais utilizada atualmente é a estabilização biológica (ANDREOLI, 2001a).

c) Condicionamento e desidratação do lodo

O condicionamento é um processo preparatório, no qual produtos químicos (coagulantes) são adicionados ao lodo, visando aumentar a captura de sólidos nos processos de desidratação. O condicionamento do lodo pode ser realizado através da utilização de polímeros orgânicos, produtos químicos inorgânicos ou de tratamento térmico (ANDREOLI et al., 2001a).

A desidratação ou desaguamento do lodo é um processo físico através do qual o teor de umidade do lodo é reduzido. Os principais processos utilizados para o desaguamento do lodo são por secagem natural ou por secagem mecânica.

- Secagem natural – fazem parte do processo de desaguamento por secagem natural o leito de secagem e as lagoas de secagem do lodo, Figura 2.3.



Figura 2.3 – Leito de secagem – Estação de Tratamento de Esgotos – ETE Curado.

- Secagem mecanizada – é usada em Estações de Tratamento de Esgotos de médio e grande porte em função da quantidade de lodo gerado. Este sistema é capaz de produzir um lodo seco chamado de “torta de lodo”, onde a concentração de sólidos totais fica em torno de 20 a 30%. Os equipamentos utilizados mais frequentemente são filtro prensa, filtro esteira e centrífugas (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

d) Desinfecção ou higienização e disposição final do lodo

A desinfecção é uma operação necessária caso o destino do lodo seja a agricultura, buscando complementar a digestão aeróbia ou anaeróbia na redução do nível de patógenos a patamares aceitáveis.

O destino final do lodo de esgoto é mundialmente um sério problema econômico e ambiental, por apresentar em sua composição germes patogênicos, metais pesados e outros compostos tóxicos, mesmo após o processo de tratamento. Este resíduo quando disposto de maneira inadequada, pode trazer danos ao meio ambiente e à saúde humana. O conhecimento da produção, constituição física e química, bem como de outras características dos resíduos sólidos coletados, constitui-se em fator fundamental para a orientação e planejamento de um descarte seguro e adequado desses resíduos (JOHN; ÂNGULO, 2003).

Atualmente, são muitas as possibilidades de aproveitamento ou disposição final do lodo de esgoto, através do descarte ou uso benéfico.

Serão comentadas algumas maneiras de disposição final do lodo de esgoto como: aterro sanitário, landfarming, uso agrícola, recuperação de áreas degradadas, incineração.

- Aterro sanitário

O planejamento inadequado de um aterro sanitário pode causar diversos impactos ambientais, tais como a poluição das águas subterrâneas e superficiais em função da lixiviação e escurrimentos de líquidos percolados que podem conter substâncias tóxicas, a poluição do ar através da produção de gases nos aterros e do solo. Estes impactos podem ser evitados através de projetos bem elaborados, escolha de locais adequados, monitoramento do aterro mesmo após o seu fechamento, e elementos de proteção ambiental (ANDREOLI, et al.; 2001a, TSUTIYA; HIRATA, 2001).

Há duas modalidades de disposição do lodo em aterros: o aterro sanitário exclusivo, que recebe apenas lodo, cujo teor de sólidos deve ser superior a 30% ou mesmo seco termicamente; e a co - disposição com resíduos sólidos urbanos, onde o lodo é misturado com

resíduos sólidos urbanos. Segundo Andreoli et al. (2001a) o teor de sólidos deve ser no mínimo 20%, pois o lodo com umidade muito elevada (acima de 80%) aumenta a produção de chorume no aterro, reduzindo a estabilidade dos taludes, além de dificultar a compactação do lixo.

- Landfarming

De acordo com Santos (2003), este tipo de disposição do lodo no solo é conhecido também como tratamento no solo. Tem como objetivo a biodegradação de resíduos orgânicos e retenção de metais pesados na camada superficial do solo. Nesse tipo de sistema o solo é utilizado como mero suporte, não havendo utilização dos nutrientes e da matéria orgânica para fins agrícolas, o que permite aplicações de quantidades elevadas, acompanhadas de intervenção tecnológica no controle ambiental.

- Uso agrícola

Segundo Andreoli et al. (2001b), para se utilizar o termo biossólido é necessário que o lodo biológico, ou secundário, seja composto principalmente de sólidos biológicos, além de ter uma composição química e biológica compatíveis com alguma utilização produtiva.

Biossólido é o lodo tratado ou processado, com características que permita sua reciclagem de maneira racional e ambientalmente correta, conforme Andreoli et al.(2001b). Portanto, para utilizá-lo de forma segura é necessário avaliar sua qualidade, além das características ambientais dos locais de forma a se evitar possíveis contaminações do meio ambiente.

De acordo com Pergorini et al.(2003), a reciclagem agrícola tem se destacado mundialmente, por reduzir a pressão de exploração dos recursos naturais e reduzir a quantidade de resíduos com restrições ambientais. O uso dos lodos de esgotos na agricultura tem sido muito estudado e no Brasil já existem avanços nos estados de São Paulo, Paraná e Brasília (SANTOS, 2003).

As culturas mais recomendadas são os cereais, pois passam por processos industriais antes de chegarem ao consumidor e, as que oferecem mais riscos são aquelas em que o produto tenha um contato direto com o solo e que pode ser consumidas cruas, como alface, cenoura, beterraba, cebola, nabo (Andreoli et al.2001b).

Vários estudos vem sendo realizados com lodo de esgoto na agricultura no estado de Pernambuco. A pesquisa realizada por Silva (2008) para avaliar a influência do lodo de esgoto na dosagem de nutrientes em solo de cultivo de plantas, no estado de Pernambuco. A verificação da influência do lodo de esgoto nos atributos de fertilidade do solo cultivado com Rabanete e Açaí por Ferreira; Lopes (2008) e no desenvolvimento do Caupi conforme Barboza, (2007) e, a interação solo-lodo de esgoto: Física, Química, Micro estrutural e a Condutividade Hidráulica (FERREIRA et al, 2008).

- Recuperação de áreas degradadas

Na recuperação de áreas degradadas também pode ser utilizado o lodo de ETE, uma vez que tem em sua composição matéria orgânica e nutrientes que contribuem em vários aspectos, como a formação de agregados, circulação de ar e de água que promovem a aeração do solo, favorecendo a recuperação e o reaparecimento de vegetação (ANDREOLI; LARA; FERNANDES, 1999, TSUTIYA; HIRATA, 2001).

Em São Paulo, na cidade de Franca, foi registrada por Tsutiya ; Hirata (2001), experiência com a prática desta alternativa onde o lodo produzido na ETE Franca foi utilizado no perímetro urbano da cidade, para controle de 14 áreas erodidas de grande porte.

- Incineração

Durante o processo de incineração, os sólidos voláteis são convertidos e gás carbônico e água na presença de oxigênio e os sólidos fixos são transformados em cinza. A incineração tem como principal vantagem a redução do volume de lodo que chega a ser de aproximadamente 10 a 20% do volume total de lodos (FONTES, 2003).

De acordo com Tsutiya ; Hirata (2001), durante o processo de decomposição, apesar dos organismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos serem eliminados, os metais pesados continuam presentes nas cinzas e, portanto, torna-se necessária uma disposição final adequada para a mesma.

Segundo Andreoli et al.(2001a), as cinzas do lodo devem ser dispostas em aterros sanitários, ou serem utilizadas como co-incineradores em fornos de cimento ou termoelétricas ou

também em misturas com o cimento que estão sendo realizadas atualmente no Japão e Europa. Também vêm sendo realizados estudos com o objetivo de aproveitar as cinzas e substituição parcial ao cimento para produção de argamassas e concretos (GEYER, 2001, TAY, 1978b, FONTES, 2003).

A emissão de poluentes para atmosfera é o principal impacto da incineração segundo Andreoli et al. (2001c), o que pode ser controlado através do aperfeiçoamento do processo de combustão e a utilização de sistemas de filtros antes dos gases serem liberados para a atmosfera.

2.5 Legislação vigente

De acordo com Duarte (2008) não existe, no Brasil, uma legislação que regulamente o uso do lodo como material da construção civil. Contudo, a NBR 10004 (ABNT 2004) pode fornecer parâmetros para a análise do risco ambiental deste tipo de destinação, considerando que os materiais de construção, após seu uso e conseqüente demolição, se constituem em resíduo.

A NBR 10004 (ABNT, 2004) estabelece os critérios de classificação dos resíduos sólidos de acordo com sua periculosidade. Esta característica é uma função das propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas do resíduo, e resultar em:

- risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices;
- riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

Segundo a NBR 10004 os resíduos são classificados em:

- Resíduos Classe I: Perigosos

São resíduos que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem oferecer riscos à saúde pública ocasionando um aumento de mortalidade ou incidência de doenças (periculosidade) e/ou riscos ao meio ambiente quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada, ou então, quando o resíduo apresentar uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogeneidade.

- Resíduos Classe II: Não Perigosos

Os resíduos não perigosos podem ser divididos em:

Resíduos Classe II A: Não inertes: aqueles que não se enquadram nem nas características da classe I nem da classe II B. Este tipo de resíduo pode apresentar características tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Classe II B: Inertes: são resíduos que quando colocados em contato com a água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, nenhum dos seus constituintes sejam solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Os lodos de esgotos, de acordo com esta norma, enquadram-se como classe II, não inertes, e segundo Santos (2003) as análises de lixiviação, de solubilização e de massa bruta de vários lodos mostraram que os lodos de forma genérica não são resíduos perigosos.

2.6 Processo de tratamento das Estações de Tratamento de Esgotos da Mangueira e Curado.

A Estação de Tratamento de Esgotos Mangueira apresentada esquematicamente na Figura 2.4 é composta por uma estação elevatória, que tem a função de elevar, por meio de bombas, os esgotos provenientes da rede para a ETE: Grade de Barras, que é o equipamento utilizado para reter o material grosseiro, não retido na estação elevatória e prejudicial ao processo de tratamento. Uma caixa de areia (desarenador) também faz parte do sistema, que é destinada a retenção de areia carregada dos esgotos, além do reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) e lagoa de polimento, com desidratação natural do lodo de excesso UASB e leitos de secagem, com uma produção de aproximadamente 10 ton./mês (massa seca com 60% de umidade) de lodo de esgoto. O lodo formado no reator UASB, decorre de tratamento de esgoto tipicamente doméstico. Segundo Faustino (2007), para uma região urbana, com lodo de esgoto basicamente doméstico, o uso do lodo de esgoto na produção de mudas para arborização é mais viável para o lodo produzido nesta ETE. Assim, para atender as restrições ambientais e técnicas, um plano de gestão de lodo da ETE Mangueira foi elaborado com o objetivo de viabilizar sua reciclagem agrícola segura e controlada, compatível com os recursos humanos, financeiros e tecnológicos.

ETE MANGUEIRA

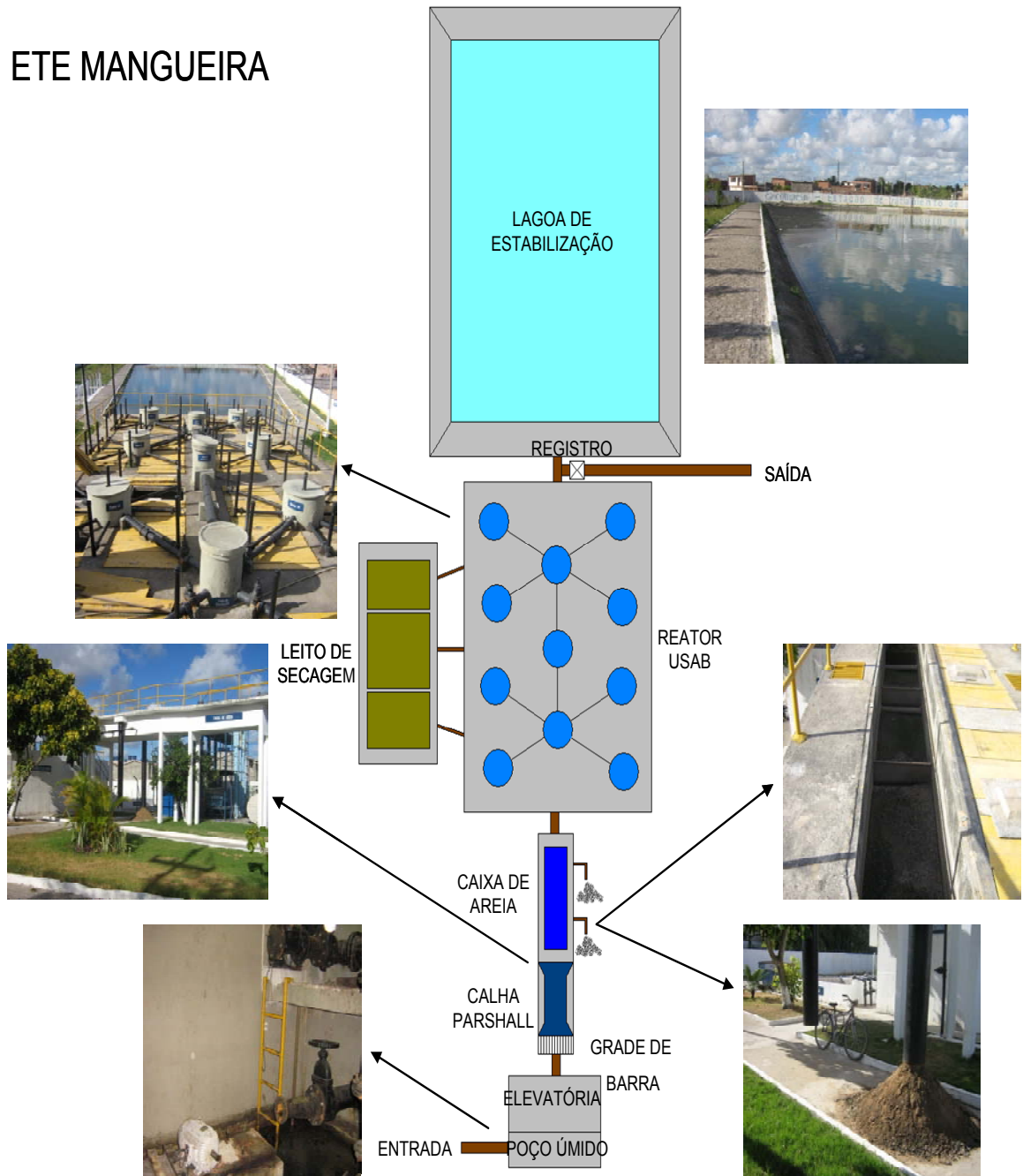


Figura 24 – ETE Mangueira

Fonte: COMPESA

No ensaio de mobilidade química realizado por Silva, (2007), utilizando o lodo desta ETE e misturas de solo-lodo nas proporções de 25 , 50 e 75 Mg ha⁻¹ obteve os resultados apresentados nas Tabelas 2.1 , 2.2.

Tabela 2.1 - Valores de pH, Condutividade Elétrica (CE), Cu⁺⁺, Zn⁺⁺, Fe⁺⁺, Cd⁺⁺ do solo e nas misturas solo-lodo.

Determinação		Solo Inicial	Solo Final	Mistura Solo - Lodo Mg ha ⁻¹		
				25	50	75
pH água 1:2,5	Topo	6,3	5,85	6,05	5,09	5,09
	Base		6,13	6,30	5,61	5,31
CE µS /cm	Topo	-	9,80	33,9	52,97	77,23
	Base		10,43	25,37	45,57	69,77
Cu ⁺⁺ mg/mL	Topo	1,5	0,15	0,31	0,28	0,30
	Base		0,22	0,10	0,22	0,23
Zn ⁺⁺ mg/ mL	Topo	1,8	0,83	0,90	1,50	1,58
	Base		0,52	0,37	0,49	0,45
Fe ⁺⁺ mg/ mL	Topo	160	26,63	28,75	28,96	37,23
	Base		30,44	24,56	23,74	23,76
Cd ⁺⁺ mg/ mL	Topo	-	0,18	0,02	0,08	0,18
	Base		0,01	0,02	0,10	0,02

Tabela 2.2. Valores médios da análise química dos efluentes coletados com 15, 30, 45 e 60 dias de lixiviação.

ATRIBUTOS	1ª quinzena de lixiviação (15 dias)				2ª quinzena de lixiviação (30 dias)			
	0 Mgha ⁻¹	25 Mg ha ⁻¹	50 Mg ha ⁻¹	75 Mg ha ⁻¹	0 Mg ha ⁻¹	25 Mg ha ⁻¹	50 Mg ha ⁻¹	75 Mg ha ⁻¹
pH água (1:2,5)	8,05	7,45	7,84	7,74	7,22	6,92	6,32	6,82
CE µS/cm	2,40	741,00	760,00	620,00	407,00	774,33	1311,00	1626,00
P (mg kg ⁻¹)	27,67	26	24,33	26,67	18,33	21,33	24,00	21,22
Na ⁺ (mg kg ⁻¹)	138,67	137	119,33	119,67	30,00	35,00	41,33	45,00
Cu ⁺⁺ (mg/mL)	0,05	0,05	0,03	0,16	0,13	0,05	0,08	0,32
Zn ⁺⁺ (mg/mL)	0,05	0,16	0,03	0,03	0,10	0,09	0,09	0,15
Fe ⁺⁺ (mg/mL)	1,65	1,17	1,57	2,53	9,45	0,53	1,72	1,68
Cd ⁺⁺ (mg/mL)	0,21	0,11	0,99	0,01	0,09	0,13	0,07	0,03

ATRIBUTOS	3ª quinzena de lixiviação (45 dias)				4ª quinzena de lixiviação (60 dias)			
	0 Mg ha ⁻¹	25 Mg ha ⁻¹	50 Mg ha ⁻¹	75 Mg ha ⁻¹	0 Mg ha ⁻¹	25 Mg ha ⁻¹	50 Mg ha ⁻¹	75 Mg ha ⁻¹
pH água (1:2,5)	6,69	6,61	6,70	6,67	6,66	6,68	6,67	6,67
CE µS/cm	353,33	1466,00	2233,33	3213,33	149,11	324,67	732,00	1206,67
P (mg kg ⁻¹)	22,19	22,47	21,96	22,20	22,21	22,12	22,18	22,17
Na ⁺ (mg kg ⁻¹)	37,26	38,01	36,91	37,39	37,44	37,24	37,36	37,35
Cu ⁺⁺ (mg/mL)	0,03	0,11	0,08	0,06	0,05	0,07	0,04	0,08
Zn ⁺⁺ (mg/mL)	0,08	0,14	0,07	0,13	0,06	0,06	0,07	0,22
Fe ⁺⁺ (mg/mL)	7,65	0,88	0,72	0,73	1,68	0,08	0,60	0,27
Cd ⁺⁺ (mg/mL)	0,25	0,06	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	0,04

Na mistura solo lodo a variação do pH tem comportamento oposto ao observado entre CE, Cu^{++} , Zn^{++} , Fe^{++} e Cd^{++} . O pH diminui com o aumento da dose; porém, os demais atributos aumentam quando os teores utilizados crescem. Ressalta-se que para os macronutrientes (K^+ , Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , Al^{+++} , P, N), bem como para o cádmio - Cd e a CE também há um aumento dos valores obtidos com o acréscimo das doses, em relação ao solo bruto, ocorrendo o contrário para o pH. As maiores concentrações dos elementos testados foram encontradas no topo das amostras, havendo uma retenção dos mesmos nos primeiros centímetros do solo, nas concentrações de 25, 50 e 75 Mg ha^{-1} em relação ao solo natural. Há um contraste entre as amostras com maiores concentrações. Há também um contraste entre as variáveis pH e CE e uma correlação direta entre a CE e a concentração dos elementos. Isso mostra que quanto mais baixo o pH, maior a disponibilidade dos elementos estudados.

A Estação de Tratamento de Esgotos do Curado

Na ETE Curado o efluente sanitário passa pelo tratamento preliminar, composto pela grade de barras e caixa de areia. Depois segue para o valo de maturação, cujo tempo de detenção é de aproximadamente de 03 dias. Passa, em seguida, pelo filtro anaeróbio de fluxo ascendente de onde segue para o decantador. Após a decantação, o efluente decantado vai para o leito de secagem. O lodo é resultado de uma decantação secundária posterior ao filtro anaeróbio de fluxo ascendente, sendo misturado na unidade de compostagem com resíduos sólidos. Nesta estação são tratados os resíduos orgânicos proveniente de lodo de esgoto e lodo industrial. A Figura 2.5 mostra a planta da ETE Curado.

A caracterização química, física, mineralógica e microbiológica do lodo de esgoto deve ser feita para que se possa classificar o lodo de esgoto conforme a ABNT 10004 e para que não ocorra nenhum risco com o manuseio e utilização deste material. Para fins de comparação se verifica os limites para os metais pesados em esgoto de acordo com o CONAMA 375/06, e valores obtidos na ETE Mangueira e Curado, mostrados na Tabela 2.3

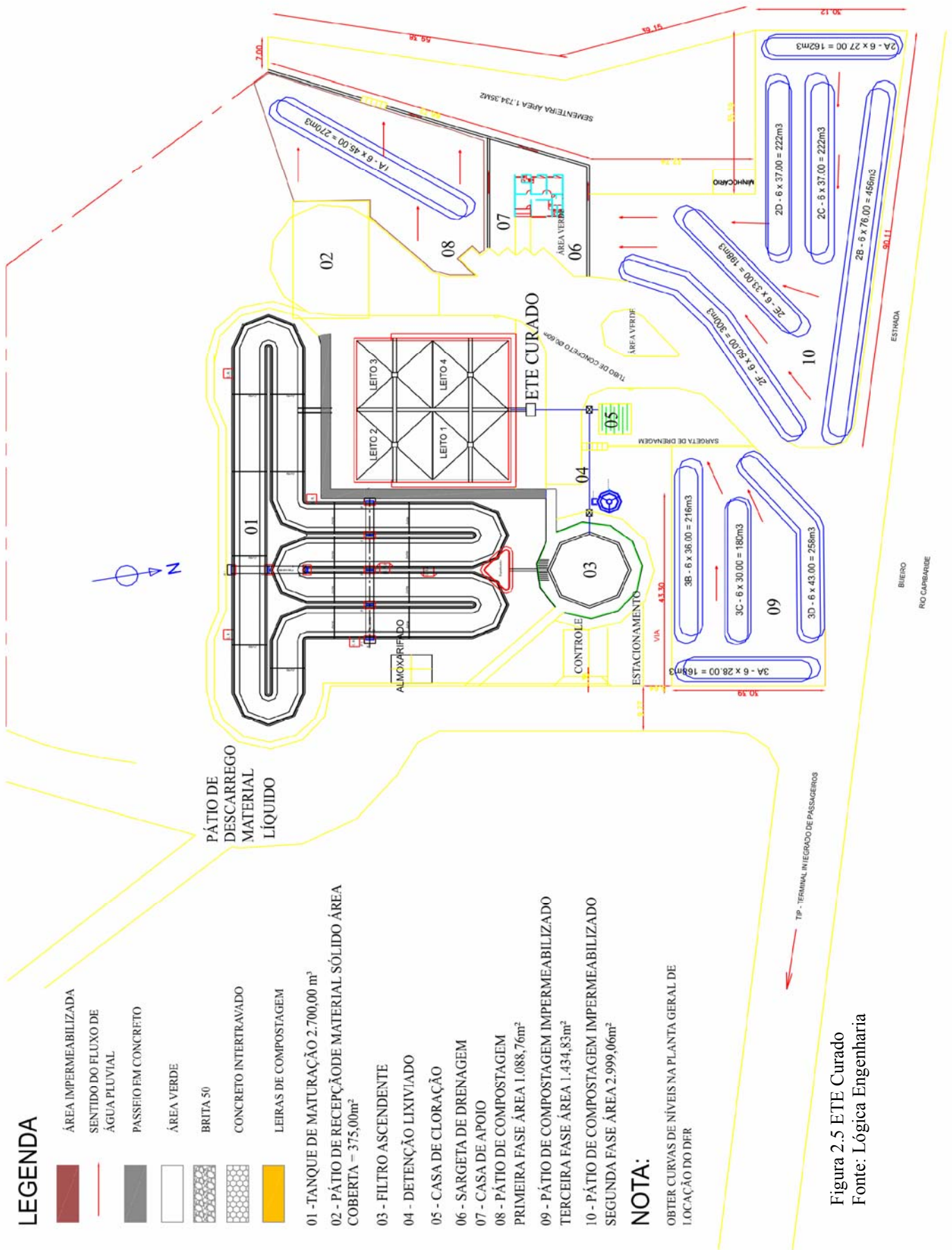


Figura 2.5 ETE Curado
 Fonte: Lógica Engenharia

Tabela 2.3- Análise química do teor de metais presentes no lodo.

Metal	Concentração máxima permitida (mg/Kg massa seca)		
	CONAMA 375/06	ETE Mangueira (1)	ETE Curado (2)
As	41	-	0,41
Ba	1300	-	242,45
Cd	39	-	1,86
Pb	300	-	9,66
Cu	1500	155	20,89
Cr	1000	-	10,49
Hg	17	-	0,157
Mo	50	-	23,21
Ni	420	-	8,73
Se	100	-	0,22
Zn	2800	548	86,54

Fonte (1) Silva,2007; Fonte (2) Lógica Engenharia

2.7 Aplicações do lodo de esgoto na indústria da Construção Civil.

A utilização de resíduos tem se mostrado uma possibilidade tecnicamente promissora como material constituinte na fabricação de produtos do setor de construção civil. Durante-Inguza et al., (2006) defendem o uso dos resíduos como uma prática ambientalmente correta, tendo em vista a diminuição do consumo de recursos naturais – tanto na forma de matéria – prima quanto na forma de energia – e a redução dos custos e danos ambientais decorrentes das formas inadequadas de disposição final deles (Durante-Inguza et al., 2006 apud DUARTE, 2008, p. 51).

De acordo com Santos (2003), diferentes formas de reciclagem de lodo de esgoto como materiais de construção estão sendo sugeridas internacionalmente como alternativas seguras para o encapsulamento dos metais pesados, redução de emissões atmosféricas poluentes, redução dos volumes requeridos em aterros sanitários e conseqüentemente redução de custos, além de consistir numa forma de aproveitamento benéfico de matéria-prima e energia disponíveis, causando uma economia na extração destes recursos do ambiente, mesmo que em pequenas quantidades, e desta forma adequando-se ao modelo de desenvolvimento sustentável.

Com o intuito de investigar as opções para gestão dos resíduos de tratamento de esgoto, Santos (2003) fez uma análise comparativa dos aspectos de mercado os quais estão envolvidos em cada sistema de reciclagem tecnicamente viável. Foi avaliada a concorrência com outros mercados, inovações tecnológicas, incentivos aos produtos/sistemas de reciclagem, demanda para produto reciclado e aspectos do sistema produtivo. Conforme resultado obtido, o mercado mais favorável para uso das tortas de lodo de esgotos foi a Indústria Cerâmica, seguido pelo mercado da Construção Civil (agregado leve) e por último o mercado do cimento. A seguir serão apresentadas algumas aplicações do lodo de esgoto. Vale registrar que não foram encontrados na literatura pesquisas utilizando o lodo de esgoto para melhoramento de solos colapsíveis.

- Fabricação de agregados leves

Brosch (1976) produziu os primeiros agregados leves utilizando lodo de esgoto. O lodo de esgoto deste estudo foi primeiramente utilizado no estado bruto e em seguida digerido e desidratado da Estação de Tratamento de Pinheiros, da cidade de São Paulo. O processo utilizado foi o de sinterização que consistiu nas seguintes etapas: Secagem do lodo; pelotização e transformação em agregados leves através da sinterização, onde os aglomerados são calcinados por autocombustão. A qualidade destes agregados foi considerada satisfatória quanto ao ensaio de resistência à abrasão e de resistência mecânica ao esmagamento.

O lodo de esgoto produzido na cidade de Londrina foi utilizado para produzir agregado leve. Dos estudos realizados pode-se concluir que o produto final apresentou características compatíveis com os requisitos e critérios estabelecidos pelas especificações brasileiras no que tange a produção de elementos de concreto para alvenaria, produção de concreto estrutural ou para isolamento térmico (MORALES; AGOPYAN, 1992).

Os pesquisadores do Instituto de Pesquisa Tecnológica - IPT, efetuaram uma pesquisa experimental de aproveitamento do lodo digerido da ETE de Pinheiros – São Paulo. Conseguiram um material que após britagem foi classificado dentro das especificações de agregado leve para fins de construção civil, com empregos em estruturas de concreto, isolamento térmico, enchimento de vazios, pré-fabricação de edifícios e blocos para alvenaria e pisos. Uma instalação semi-industrial, cujo projeto foi desenvolvido por empresas brasileiras, foi implantada junto à ERQ Leopoldina (Estação Recuperadora da Qualidade das

Águas, com componentes mecânicos e elétricos de fabricação nacional, e esteve em operação de Junho de 1979 até o final de 1982 (SANTOS, 1992).

O processo de produção do agregado leve, a partir do lodo digerido dos esgotos, passava pelas seguintes operações unitárias: desidratação do lodo; pós-secagem do lodo centrifugado; dosagem e mistura dos componentes; pelletização; secagem das pelotas por leito de fluidizado; sinterização; quebramento e britagem do sínter e estabilização e classificação do sínter (BROSCH; ALVARINHO; SOUZA, 1976; SANTOS 2001). A Figura 2.6 mostra o fluxograma do processo.

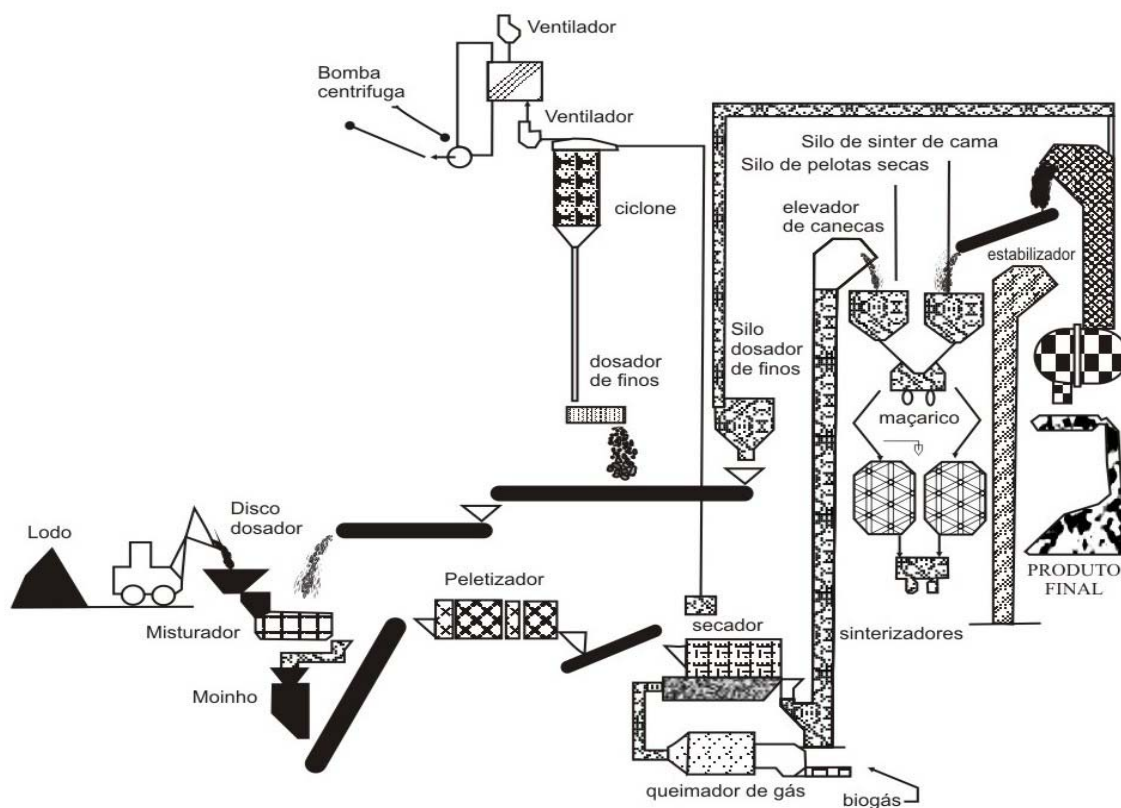


Figura 2.6- Fluxograma do processo de agregado leve de lodo (SANTOS, 1992).

O controle de qualidade do ALL – (Agregado leve de lodo), era feito pelos laboratórios de concreto da Sabesp – Secretaria de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Os concretos feitos com o ALL, comparados com concretos de mesmo traço usando argila expandida Cinasita, única concorrente no mercado nacional na época, mostraram melhor trabalhabilidade. Quanto à resistência à compressão axial, obtiveram valores máximo de 29 MPa, apenas 12 % abaixo dos concretos produzidos com argila expandida . O ALL foi usado

em obras da própria Sabesp, no concreto das passarelas da Rodovia Anchieta, e como enchimento nas lajes rebaixadas do Shopping Ibirapuera (SANTOS, 2003).

Conforme Santos (2003), entre vários trabalhos na fabricação de agregados leves, internacionalmente é possível destacar aquele desenvolvido pelo Dr. George Harrison para a San Diego Region Water Reclamation Agency. Ele passou a produzir um agregado leve a partir do lodo de esgoto por um processo chamado CCBA (Coordinate Chemical Bonding Adsorption). O processo constava das seguintes etapas: mistura do esgoto com argila, alumínio e ácido poliacrílico; coagulação e floculação; decantação (lodo com 45% de sólidos); mistura com argila; extrusão; corte para formação de pelotas com cerca de 6 mm de diâmetro; e queima entre 1070 a 1095°C. O fluxograma deste processo é apresentado na Figura 2.7. O agregado leve estava em conformidade com as normas da ASTM. A partir deste agregado obteve-se concretos de resistência acima de 35 MPa e blocos com mais de 6,5 MPa (GEORGE, 1986).

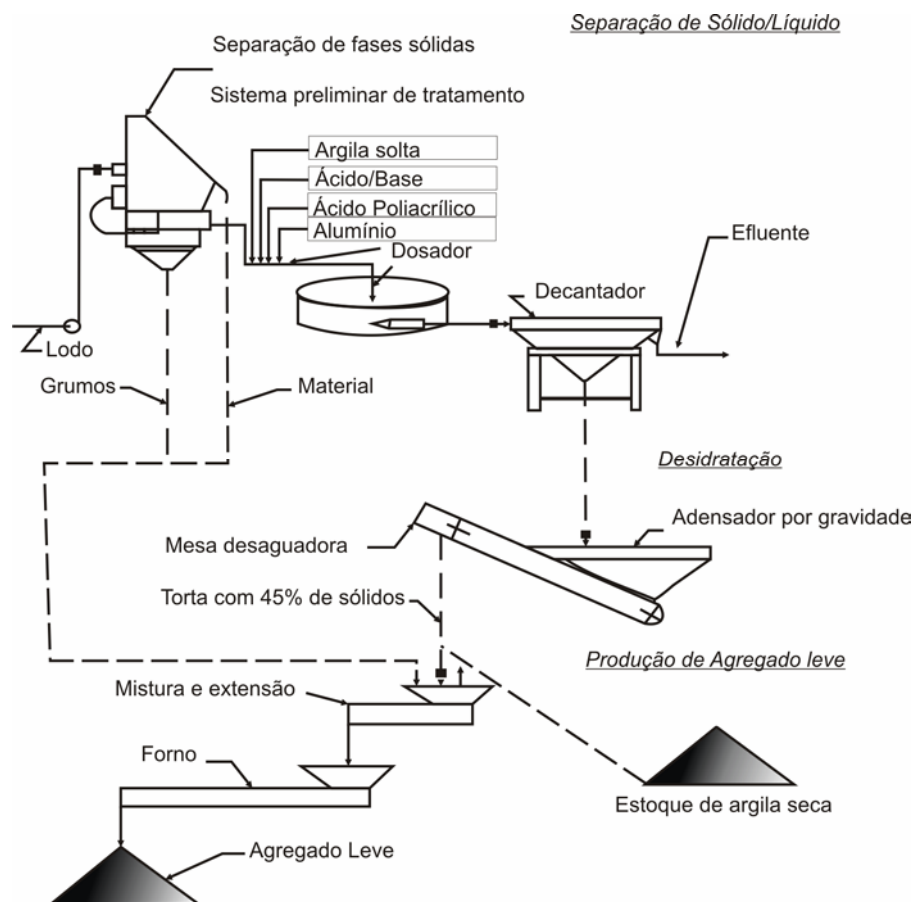


Figura 2.7- Fluxograma do processo CCBA de fabricação de agregado leve (George, 1986).

Para Fontes (2003), a redução na resistência à compressão é pequena para uma substituição de até 30% de lodo, em relação à mistura feita apenas com cimento Portland; além disso, a capacidade de absorção dos corpos-de-prova aditivados com lodo foi reduzida, resultando numa estrutura mais durável. Tal fenômeno é explicado pela granulometria do lodo ser mais fina do que a do cimento. Segundo Geyer (2001) as possibilidades de utilização das cinzas em concretos se mostram restritas a concretos de baixa resistência.

- Matéria prima para fabricação de cimento Portland e pozolanas

Um estudo em escala laboratorial procurou desenvolver um cimento Portland a partir de tortas de lodo de esgoto (TAY; SHOW, 1991). O cimento Portland tem como matérias - primas, rocha calcária e argila, sendo que a última foi substituída no estudo pelo lodo desidratado. Foram analisadas as propriedades do cimento assim produzido, bem como do cimento Portland convencional.

O primeiro passo foi a secagem da torta de lodo, condição necessária para moagem e mistura adequada com a pedra calcária. As amostras de lodo desidratado foram secas a 105°C, moídas e misturadas com pó de pedra calcária, e diferentes proporções. Estas misturas foram moídas entre 250 e 350 µm, incineradas a temperaturas e tempos de detenção diferentes.

O produto final foi moído numa granulometria menor que 80 µm . Foram analisadas as propriedades do cimento assim produzido, bem como do cimento Portland convencional. O melhor cimento produzido foi o resultante da mistura de 50% de lodo seco e 50% de pedra calcária, em massa, com temperatura de queima de 1000°C e tempo de resistência no forno de 4 horas.

Os testes revelaram que não houve problemas de expansão. O tempo de início de pega foi rápido, o que pode ser atribuído à falta de adição de gipsita normalmente incorporada aos cimentos convencionais, e a reatividade pozolânica foi muito baixa. A resistência a compressão após 28 dias atingiu 6,28 MPa - cerca de 27% do valor obtido para um cimento Portland comum. Apesar das deficiências inerentes do estudo, o mesmo revela uma aplicação potencial.

Onaka (2000), testou o processamento de lodo durante nove meses consecutivos em uma fábrica de cimento, com bons resultados. O processo iniciava-se com a secagem do lodo, transformando-o em péletes, porém conservando seu teor de matéria orgânica e energia. Esses péletes, de 2 a 10 mm de diâmetro, foram lançados no forno junto com o restante da matéria-prima do cimento. A matéria orgânica foi utilizada como fonte complementar de calor e a parte inorgânica integrou o clínquer. Os traços de metais pesados foram fixados em teores ainda mais diluídos na massa do cimento. O monitoramento dos gases e o controle de qualidade do produto não indicaram nenhuma alteração em relação aos valores sem o uso do lodo. Os resultados revelam que a incorporação de 2% de lodo seco como matéria prima em fornos de clínquer permitiria consumir todo o lodo gerado no Japão.

Outra aplicação é o uso de cinzas do lodo calcinado de maneira controlada na produção de pozolanas que podem substituir parcialmente o clínquer do cimento. A reatividade pozolânica no lodo calcinado entre 750°C e 800°C, devido à presença de montmorilonita foi confirmada por Morales (1994), tendo concluído ser possível substituir até 35% do consumo de cimento Portland.

- Matéria prima para fabricação de cerâmica

A informação mais antiga encontrada sobre produção em escala industrial de tijolos utilizando resíduos de tratamento de esgotos refere-se a ETE de Fishwater Flats, Port Elizabeth, na África do Sul. Desde 1979, uma olaria distante 15 Km da ETE, produziu mais de 120 milhões de tijolos a partir de uma mistura em volume de 30% de lodo com 70 % de argila, para tijolos comuns, e de 5 a 8% de lodo para tijolos de acabamento (SLIM; WAKEFELD, 1991 apud WERTHER; ORGADA, 1999).

As tortas de lodo misturadas à argila são moídas formando uma massa; esta massa homogênea recebe água tendo sua umidade ajustada em 20% à massa é extrudada e os tijolos cortados. A etapa seguinte é a secagem em ambiente coberto a temperatura ambiente por duas semanas, ou em estufas por dois dias, nua temperatura entre 60 e 65° C; seguem para a queima, resfriamento e estocagem.

Num forno contínuo, os tijolos moldados da mistura de lodo e argila aquecem até atingir uma temperatura de cerca de 150° C. Neste momento o lodo começa a pirolizar e a combustão dos

voláteis se inicia, aumentando rapidamente a temperatura dos blocos para 800° C. No ponto do forno em que o lodo é completamente queimado e o gradiente térmico diminui, um combustível externo é queimado para elevar a temperatura a 960° C. O uso do lodo nesta fábrica é responsável por uma economia de 55 litros de óleo combustível para cada 1000 tijolos produzidos (WERTHER; ORGADA, 1999).

Tais tijolos são reconhecidos pela excelente qualidade; cor e textura uniformes, ausência de trincas e são indistinguíveis em aspecto e odor. Os valores de resistência a compressão para tijolos aparentes e não- aparentes são respectivamente de 40,7 e 38,3 MPa – valores extremamente superiores às normas locais que são de 17,0 e 14,0 MPa. A absorção de água em 24 horas foi de 13%, 30% maior que os tijolos fabricados na região, o que agregou vantagem ao produto, pois aumentou sua aderência às argamassas e aumentou os confortos térmicos e acústico.

As vantagens do processo são a economia de água, a produção de tijolos mais leves, redução do custo de transporte, economia de combustível no forno e o aproveitamento dos gases de queima para secagem das tortas de lodo (WERTHER; ORGADA, 1999).

Herek (2005) analisaram blocos cerâmicos de um tijolo de seis furos, em escala reduzida, confeccionados com lodo seco oriundo de uma ETE de indústria têxtil. Tendo sido demonstrado que a fabricação dos blocos pode ser uma alternativa viável, uma vez que a presença de fibras têxteis no lodo deve ter contribuído para o aumento da resistência à compressão dos corpos-de-prova fabricados com 10% de lodo.

Muitas outras pesquisas de incorporação de lodo desidratado e de cinzas de lodo foram desenvolvidas. Segundo Onaka (2000) no Japão cerca de 70% das tortas de lodo é incinerada, sendo que parte das cinzas é utilizada na produção de tijolos e blocos de piso intertravados.

Segundo Fontes (2003), uma forma de reduzir o volume de lodos de esgotos gerados é a incineração, com redução do volume em torno de 85%. Sendo necessária uma área menor para disposição e uma possível utilização da cinza na construção civil devido à eliminação de matéria orgânica e a possibilidade de gerar energia, apesar do custo alto.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Nos experimentos da pesquisa utilizou-se um solo e dois tipos de lodo. O solo foi coletado na Estação Experimental de Itapirema do Instituto Agrônômico de Pernambuco (IPA), município de Goiana/PE e os lodos foram coletados na Estação de Tratamento de Esgoto da Mangueira (ETE Mangueira) e Estação de Tratamento de Esgotos do Curado (ETE Curado), situadas na Região Metropolitana do Recife, Pernambuco.

3.1 Programa Experimental: Solo, Lodo e misturas Solo-Lodo

O programa experimental realizado no solo, no lodo e nas misturas solo lodo é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Descrição dos ensaios para o solo, lodo e misturas solo-lodo

Ensaio	Descrição	Quantidade	Lodo ETE	
			ETE Mang..	ETE Curado
Caracterização Física do Solo, Lodo e Solo - Lodo	Ensaio de Granulometria com defloculante, Limites de consistência, Peso específico real dos grãos e Compactação.	20	X	X
Edométricos Simples	Ensaio edométrico realizado com diferentes tensões verticais de inundação, com amostras compactadas, inundadas com água destilada.	56	-	X
Edométricos Duplos	Ensaio edométrico realizado com amostras compactadas à umidade constante, e previamente inundadas com água destilada.	16	-	X
Microscopia Eletrônica de Varredura	Análise microestrutural do Solo, Lodo e Solo - Lodo	10	X	-
Condutividade Hidráulica	Ensaio para determinação da condutividade hidráulica do Solo, e Solo - Lodo	08	X	-
Mobilidade Química	Ensaio de avaliação da mobilidade dos elementos químicos.	12	X	-
Caracterização Química	pH em água, em KCL e em CaCl ₂ , Carbono orgânico, alumínio trocável (Al ⁺⁺⁺), cálcio (Ca ⁺⁺) trocável, magnésio (Mg ⁺⁺) trocável, sódio (Na ⁺) trocável, potássio (K ⁺) trocável, porcentagem de saturação de sódio (Na+Al ⁺⁺⁺), ataque sulfúrico, porcentagem de ferro no extrato sulfúrico (Fe ₂ O ₃), sílica no extrato sulfúrico (SiO ₂), porcentagem de alumínio no extrato sulfúrico (Al ₂ O ₃), condutividade elétrica no extrato de saturação.	29	X	X
Caracterização Mecânica	Resistência à compressão, índice esclerométrico, velocidade ultrassônica e absorção por capilaridade.	72	-	X

Para analisar a caracterização física, química, micro estrutural e a condutividade hidráulica utilizou-se o lodo da Estação de Tratamento de Esgotos da Mangueira na interação solo - lodo e para a caracterização física, química, compressibilidade, colapso e como agregado no concreto utilizou-se o lodo da Estação de Tratamento de Esgotos do Curado.

3.2. Preparação das amostras de solo e da mistura solo-lodo

Para o ensaio de granulometria conjunta por peneiramento e sedimentação, bem como para a determinação de limites de consistência, os materiais foram secos ao ar e destorroados manualmente. A preparação das amostras do solo para os ensaios de caracterização física seguiram as normas da ABNT (1986).

A amostra do lodo coletada da Estação de Tratamento de Esgotos da Mangueira foi seca ao ar, triturada e passada em peneira de malha de 4 mm segundo Silva (2007) e fornecido ao Laboratório de Geotecnia já seco e em grumos.

O lodo da Estação de Tratamento de Esgotos do Curado foi proveniente do leito de secagem da ETE e em seguida acondicionado em sacos plásticos para ser transportado ao laboratório da Universidade Católica de Pernambuco e colocado para secar ao ar e depois de seco foi destorroado e passado na peneira com abertura de malha 4 mm, Figuras 3.1 e 3.2 .



Figura 3.1 - Lodo seco - Estação de Tratamento de Esgoto do Curado.



Figura 3.2 - Lodo peneirado- Estação de Tratamento Esgoto do Curado.

A mistura solo-lodo utilizando lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgoto Mangueira foi realizada nas proporções equivalentes a 25, 50 e 75 Mg ha⁻¹ concentrações essas da pesquisa FIUC que tinha por finalidade a utilização do lodo de esgoto ao solo para fins de agricultura (FERREIRA et al., 2008). Como essas proporções são extremamente pequenas para fins de Engenharia Civil foram escolhidas as proporções de peso seco de 5 %, 10 % e 15 % de lodo da Estação de Tratamento de Esgoto do Curado, para ser utilizado em substituição parcial de peso do agregado miúdo.

A granulometria do lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgotos da Mangueira e da Estação de Tratamento de Esgotos do Curado foi avaliada seguindo as recomendações da ABNT 1984 e a umidade foi avaliada na temperatura de 45° C até peso constante, com pesagens consecutivas de 24 horas.

3.3 Métodos dos Ensaio

3.3.1 Caracterização Física

Após as misturas os ensaios de caracterização física foram, realizados segundo as normas da ABNT: Preparação de Amostras (NBR 1986), Análise Granulométrica – (NBR 1984), Massa Específica dos Grãos dos Solos – (NBR 1984a), Limite de Liquidez – (NBR 1984b), Limite de Plasticidade – (NBR 1984c), Ensaio de Compactação – (NBR 1984d) e nos ensaios edométricos convencional simples e duplo foi aplicada à norma de Adensamento (NBR 1990). A Figura 3.3 apresenta o solo natural.



Figura 3.3– Solo natural – Areia Siltosa

3.3.2 Ensaio de Mobilidade Química

Para este ensaio foram utilizados os resultados dos experimentos realizados por Silva (2007), que trabalhou com o mesmo solo e lodo da Estação de Tratamento de Esgotos da Mangueira.

A mobilidade dos elementos químicos foi avaliada utilizando-se tubos de PVC de 0,10 m de diâmetro onde foram colocadas até 0,21 m de altura amostras do solo natural e misturas de solo-lodo equivalentes a 25, 50, 75 Mg ha⁻¹, sendo 3 de cada amostra, totalizando-se 12 colunas (Figura 3.4). O lodo foi misturado com o solo nos primeiros 50 mm, simulando a disposição do resíduo na superfície. Em cada coluna, diariamente e durante 60 dias, foi aplicada água deionizada relativa à capacidade de campo do solo, sendo os efluentes coletados quinzenalmente sob a base da coluna para análise química completa, segundo EMBRAPA (1997).

Após 60 dias e durante 5 dias consecutivos, a mesma quantidade de água foi colocada sendo cronometrada a quantidade de efluentes em uma proveta graduada. Após o término dos ensaios, foram determinadas as umidades do solo natural e das misturas solo-lodo no topo (0-0,10 m) e na base (0,10-0,20 m) de cada coluna, avaliadas as dimensões, altura e diâmetros, em oito pontos distintos de cada amostra nas colunas para avaliação do volume, bem como a determinação do peso úmido das amostras.



Figura 3.4. Colunas de PVC com amostras do solo natural e com misturas de solo-lodo equivalentes a 25, 50, 75 Mg ha⁻¹ (SILVA, 2007).

3.3.3 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura

A contextura (microestrutura) do solo e das misturas solo-lodo da EE Mangueira foram observadas a partir das amostras coletadas no topo e na base das colunas. Foram retiradas cuidadosamente e colocadas para secar ao ar, onde eram preparados três corpos de prova de formato prismático com base de 9,8 mm e altura de 8 mm. Os corpos de prova foram moldados de modo que nenhum instrumento cortante ou pontiagudo tocasse na superfície de observação, utilizando a mesma técnica descrita por Ferreira (1995). Os corpos de prova foram fixados em um cilindro de alumínio com diâmetro de 9,8 mm e altura de 11 mm por meio de fita 3M e reforçada por pequena quantidade de cola no contato. Os corpos de prova foram colocados na campânula de vácuo do tipo Fine Coat Íon Sputter JfC 1100 para metalização, onde recebiam uma película de ouro fina que tinha por finalidade o carregamento eletrostático propiciando uma boa condução do feixe de elétrons. Em alguns corpos de prova foi necessário fazer uma segunda metalização, porque a primeira não cobria totalmente a amostra e não se podia obter uma maior resolução. Após o processo de metalização, as superfícies das amostras foram observadas e fotografadas no equipamento JSM LV1600 Scanning Microscope de marca Joel da UNICAP, operando a 15 Kv.

3.3.4 Ensaio de Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica foi determinada em laboratório utilizando-se o permeâmetro de paredes flexíveis, em amostras de solo natural e de solo-lodo nas mesmas condições de umidade média e peso específico seco médio das amostras das colunas. O sistema do permeâmetro é composto de um painel de controle principal e é capaz de testar uma amostra, enquanto funciona como um controlador para outras amostras. O painel aumenta a capacidade do sistema sem duplicar as funções principais. O equipamento pode realizar até três ensaios simultaneamente, com pressões diferentes, Figura 3.5.



Figura 3.5. Permeâmetro de paredes flexíveis para obtenção da condutividade hidráulica (FERREIRA, 2008)

As amostras do solo natural e das misturas do solo-lodo foram compactadas estaticamente nas umidades médias e nos pesos específicos secos médios obtidos dos ensaios das colunas do experimento. Os corpos de prova tinham altura média de 109 mm e diâmetro médio de 98 mm. Na célula, o corpo de prova era colocado em contato com papel filtro e pedra porosa no topo, na base e revestido por uma membrana látex de proteção. Tomou-se o cuidado durante o encamisamento do corpo de prova, usando liga de borracha para melhorar a fixação e oferecer segurança à sua lateral, evitando contato com a água nesta face.

Após a montagem e conexão da célula ao painel de controle, começou a encher de água, aplicando-se pressão lateral para remoção de ar das pedras porosas e das linhas das tubulações, drenando-se um pouco de água do conjunto, com a finalidade de retirar as bolhas de ar da superfície. A saturação das amostras era praticamente imediata, sendo constatada por meio do parâmetro $\bar{B} = \Delta u / \Delta \bar{\sigma}_3$ (Δu – acréscimo poro-pressão da água e $\Delta \bar{\sigma}_3$ acréscimo e tensão confinante), utilizando-se um transdutor com leitura externa de poro-pressão. Após a saturação, aplicou-se nas amostras uma tensão confinante, $\bar{\sigma}_3$ de 0, 15, 25, 50, 75, 100, 150, 200 KPa, em etapas. Entre cada etapa, e após consolidação, determinava-se a condutividade hidráulica. Para estabelecer o fluxo de água na amostra, aplicava-se uma diferença de tensão entre a base e o topo de 5 kPa, quando, então, se media o tempo necessário para que um

volume de 5.000 mm^3 de água atravessasse o corpo de prova, processo repetido até que se obtivesse três intervalos de tempo iguais.

3.3.5 Ensaio Edométrico Duplo e Simples

a) Preparação dos Corpos de Prova

A amostra natural do solo foi colocada para secar ao ar livre, destorroada e passada na peneira nº 10. Para determinação da umidade higroscópica foi separado uma amostra de aproximadamente 1 Kg, do solo natural e do lodo. Após a determinação da umidade higroscópica do solo natural de 1,60 % e do lodo 2,48 %, foi adicionada água na amostra do solo natural e nas três misturas com 5%, 10% e 15% de modo que atingisse o valor da umidade de 5,0 %. As amostras foram colocadas nas cápsulas e levadas a câmara úmida por 24 horas e após esse tempo era verificada a umidade.

Com as amostras de solo e solo-lodo nas umidades desejadas, foram calculados os volumes de solo necessário para compactação dos corpos de prova com pesos específicos seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$ e $17,00 \text{ kN/m}^3$ com graus de compactação de 82% e 94%, respectivamente, na umidade de 5% correspondente a um desvio de umidade ótima de 3,66%. Por ser uma areia, para minimizar perdas de umidade e de solo por manuseio de moldagem, os corpos de prova foram compactados nos anéis das células edométricas, que tinha altura média de aproximadamente 20,00 mm e diâmetro 76,25 mm.

A compactação foi realizada estaticamente numa prensa do tipo CBR manual com capacidade de 40 kN. O volume de solo, calculado previamente, era colocado no anel e encaixado no molde de compactação. O molde apresenta 2,5 vezes o valor da altura dos corpos de prova, para colocação do solo ainda não compactado. A forma do molde garante que o solo não seja compactado além do necessário, devido ao sistema de segurança do topo, onde há um contato do pistão com o topo do molde, impedindo que o pistão compacte mais o solo, Figura 3.6.

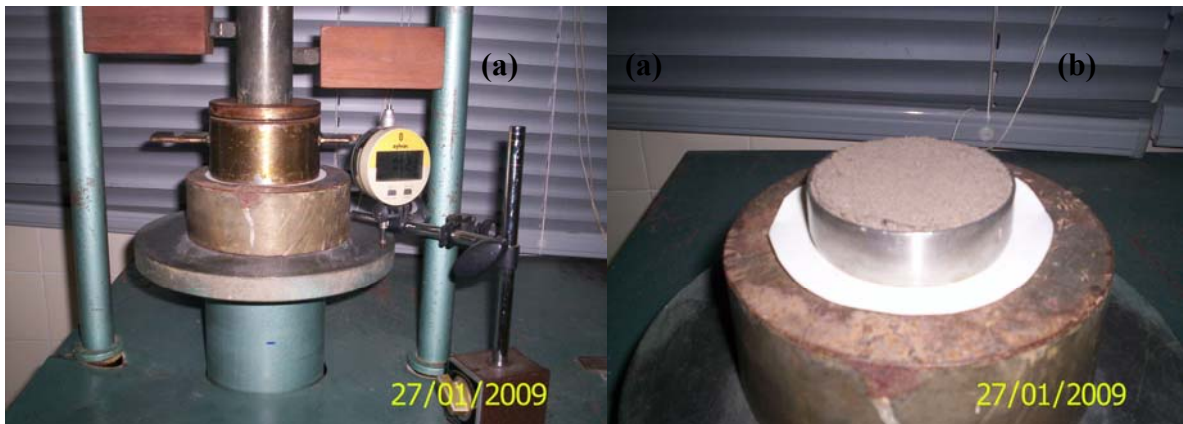


Figura 3.6 - Molde de compactação no início e após a compactação estática. (a) Molde na prensa no início da compactação ; (b) Molde após a compactação.

b) Procedimento dos Ensaios

Os ensaios edométricos, simples e duplos, foram realizados para determinar os parâmetros de compressibilidade e colapsibilidade das amostras do solo natural e misturas solo-lodo nas proporções de 5%, 10% e 15%, com umidade de aproximadamente 5,0% e pesos específicos de $15,00 \text{ kN/m}^3$ e $17,00 \text{ kN/m}^3$. As amostras foram confinadas lateralmente, e utilizou-se água destilada para inundação. Foram utilizados cinquenta e seis corpos de prova para uso em ensaios edométricos simples e dezesseis corpos de prova, para ensaios edométricos duplos.

Os ensaios foram realizados no laboratório de Geotecnia da Universidade Católica de Pernambuco, em prensas do tipo Bishop convencional, com sistema de carregamento através de pesos e pendural, com relação de 1:10, e células edométricas do tipo anel fixo. As leituras das deformações foram acompanhadas por meio de extensômetro, com sensibilidade de 0,01 mm.

Os procedimentos de montagem foram os mesmos para todos os ensaios. O corpo de prova compactado no anel era colocado sobre o papel filtro (Figura 3.7), assente sobre a pedra porosa (seca ao ar) e o conjunto, montado na célula edométrica. Após a montagem o topo da célula era envolvido por um plástico afixado por ligas de borracha para evitar perda de umidade; este procedimento foi adotado, inicialmente, por Jennings (1957), e utilizado até os dias de hoje por vários autores (FERREIRA, 1995; FUTAI, 1997; GUIMARÃES NETO, 1997; SOUZA NETO, 1998 e 2004; MOTTA, 2006) entre outros. Apenas nos ensaios duplo,

com a amostra previamente inundada, não era necessário se fazer a proteção do topo da célula.

No início dos ensaios, simples ou duplo, uma tensão mínima de 3,75 kPa era aplicada ao sistema para o assentamento e para a leitura inicial do processo de deformação. O recalque decorrente dessa tensão era atribuído à acomodação do sistema, não sendo considerado no cálculo das deformações.

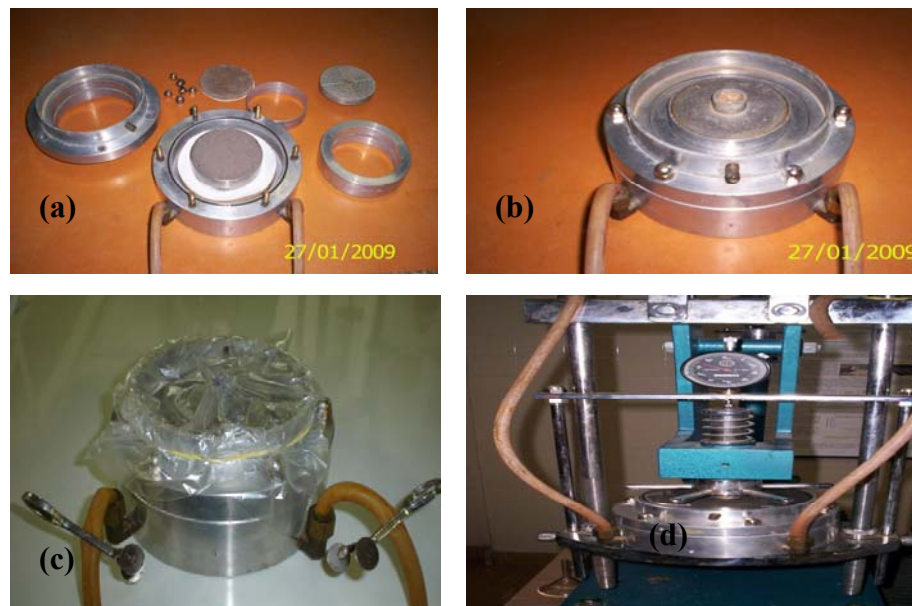


Figura 3.7–Procedimento de montagem das células edométricas : (a) corpo de prova na célula edométrica; (b) célula edométrica após a montagem; (c) célula com proteção para evitar perda de umidade; (d) prensa onde será colocada a célula edométrica.

As tensões verticais (σ_{vi}) foram aplicadas de forma incremental ($\Delta\sigma/\sigma=1$). Diferentes corpos de prova foram inundados nas tensões de 10, 20, 40, 80, 160, 320 e 640 kPa. O tempo de duração de cada estágio de tensão era tal que a deformação entre dois intervalos de tempos consecutivos ($\Delta t/t=1$) fosse inferior a 5 % da deformação total do solo ocorrida até o tempo anterior, conforme Ferreira, (1995). Quando esse tempo era inferior a uma hora, deixava-se pelo menos uma hora. A inundação foi feita da base para o topo da célula. As deformações devido à inundação foram acompanhadas até a estabilização e as leituras foram feitas durante 24 horas, nos tempos de 0,6; 0,25; 0,50; 1; 2; 4; 8; 15; 30; 60; 120; 240; 480 e 1440 minutos. No final do ensaio, após 24 horas do início da inundação sob as diversas tensões, as células eram drenadas e desmontadas e os corpos de prova retirados e pesados para determinação do teor de umidade do solo e das misturas solo-lodo.

Nos ensaios edométricos duplo foram experimentadas duas condições de carregamento: na umidade natural (umidade constante), e com o corpo de prova previamente inundado. A primeira condição segue toda a sequência descrita para o ensaio edométrico simples, mas sem inundação, com carregamento até 640 kPa e depois descarregando para 320 kPa, 80 kPa e 20 kPa, aí então era desmontada para retirada do corpo de prova e determinação do teor de umidade do solo e misturas solo-lodo. Na segunda condição o corpo de prova, sob uma tensão mínima de 3,75 kPa, era inundado e suas deformações eram acompanhadas até a estabilização. Só após 24 horas da inundação eram iniciados os estágios de carregamento, com o objetivo do solo alcançar a saturação. As tensões verticais foram aplicadas da mesma forma incremental dos ensaios edométricos simples ($\Delta\sigma/\sigma=1$), iniciando-se com 10 kPa até a tensão de 640 kPa e descarregando-se para 320 kPa, 80 kPa e 20 kPa. Com o mesmo tempo de duração para cada estágio de tensão do item anterior.

3.3.6 Caracterização Química do solo, lodo e mistura solo-lodo

Os ensaios químicos do solo, lodo e da mistura solo-lodo foram realizados no laboratório de Análises Químicas da Universidade Católica de Pernambuco e os métodos utilizados estão de acordo com a metodologia de análise de solos adotada pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, em conformidade com o Manual de Métodos de Análise de Solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997). Estes ensaios foram realizados no solo e nas misturas solo-lodo da ETE Curado.

O procedimento de preparação das amostras foi o mesmo tanto para o solo como para o lodo. As amostras coletadas, foram espalhadas em tabuleiros para secar e destorroadas com auxílio da mão de grau de almofariz. Após a identificação foram encaminhadas ao laboratório de Análises Químicas para realização dos ensaios. Os ensaios foram realizados em triplicata e a diferença entre resultados não ultrapassou 0,1 % do valor em relação às titulações. Alguns ensaios estão descritos segundo (PAIVA, 2008).

- Potencial Hidrogeniônico - pH

No ensaio foi utilizado um equipamento da marca MARCONI (MOD 2006) com eletrodo combinado, metodologia aplicada pelo Apha (1992). O pH nas amostras de solo e lodo serve para determinar a presença de alumínio trocável e também a predominância de argila em

processo de intemperização que é verificado pela variação do pH em água e o pH em KCl. Verifica também a tendência dos sistemas com altas concentrações de H^+ e Al^{+++} de flocular.

- Carbono orgânico e matéria orgânica

Na determinação deste ensaio foi utilizado um bloco digestor, para efetuar a reação do dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) com a matéria orgânica em meio fortemente ácido (H_2SO_4) para em seguida, ser titulado com sulfato ferroso amoniacal. Como a quantidade de matéria orgânica no solo define a formação de um maior ou menor teor de agregado na estrutura, os agregados formados por teor de matéria orgânica $> 3,5\%$ são considerados instáveis. E o teor de carbono orgânico varia com o teor de argila na fração mineral, o cálculo de matéria orgânica é sempre 1,724 vezes maior que o carbono orgânico.

- Acidez trocável

A acidez trocável ($H^+ + Al^{+++}$) corresponde à acidez liberada pela reação com uma solução de cloreto de potássio não tamponada, também definida como acidez real que é utilizada na determinação da Capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva, também definida como soma de bases (EMBRAPA, 1997). Foi determinada através da titulação com NaOH e fenolftaleína como indicador.

- Condutividade elétrica e percentual de água no extrato de saturação.

A condutividade elétrica no extrato de saturação é utilizada para prever a quantidade de sais (cátions e ânions). O ensaio foi realizado por condutivimetria e o extrato determinado através da volumetria.

- Superfície específica e adsorção de azul de metileno.

A solução de azul de metileno aquosa em contato com os argilominerais forma uma camada em torno da superfície, envolvendo toda partícula, sendo possível através dessa técnica, calcular a superfície específica (SE) e a adsorção de azul metileno. Desta forma, quanto maior a superfície específica do argilomineral, maior a quantidade de azul metileno adsorvido e

menor será o tamanho das partículas. O ensaio foi realizado através da volumetria de absorção. (SANTOS, 2006 apud PAIVA, 2008, p.45).

É uma técnica rápida e de simples execução onde é utilizada uma solução de azul metileno para determinar a superfície específica e a adsorção de azul de metileno onde os cátions que estão adsorvidos nos argilominerais são substituídos pelo azul de metileno (FABRIL, 1994 apud PAIVA, 2008, p.45).

3.4 Utilização do lodo de Esgoto como agregado miúdo em Concreto

Nesta pesquisa foi estudada a viabilidade de utilização do lodo de esgoto como substituto parcial da areia para produzir concreto. Visando avaliar as potencialidades deste resíduo, foram realizados ensaios físicos e mecânicos em todas as misturas, no laboratório de Materiais da Universidade Católica de Pernambuco.

O procedimento experimental foi feito em três etapas: caracterização das matérias-primas (areia, brita, cimento e lodo de esgoto), estudos de dosagens para a qualificação e seleção de quatro traços de concreto, sendo três destes com diferentes proporções de lodo em relação ao peso seco da areia e um traço padrão (concreto-referência), sem a adição de lodo e, por último, a avaliação das misturas no estado fresco e o desempenho dos concretos no estado endurecido.

Foram escolhidos dois traços 1: 0,54:1,54 para relação água cimento ($a/c = 0,57$) e 1:2,5: 2,34 e relação água cimento ($a/c = 0,65$), a fim de comparar os resultados da presente pesquisa com outros estudos utilizando o lodo de esgoto como da Avaliação da resistência à compressão do concreto com uso de agregado de Resíduos de Construção e Demolição (1: 0,54:1,54 : 0,57) (Oliveira et al, 2007), e do Estudo da Pontencialidade das cinza de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland (1:2,5: 2,34:0,65) (FONTES,2003).

Os componentes utilizados na confecção do concreto foram:

- Cimento Portland composto resistente a sulfatos CP II Z 32 RS, fabricado de acordo com as normas brasileiras.

- Os agregados utilizados na confecção de concreto foram à areia quartzosa lavada e a pedra britada de dimensão 25 mm. Os principais parâmetros físicos dos agregados miúdos e graúdos foram analisados segundo recomendações da NM 1987 .
- A água utilizada para a produção do concreto foi proveniente da concessionária de abastecimento da cidade do Recife – Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

3.4.1 Dosagem do Concreto

Para a mistura dos concretos utilizou-se uma betoneira, com capacidade de 110 litros, visando uma resistência à compressão aos 28 dias de 25 MPa. Primeiramente, foram adicionados os agregados graúdos, seguidos dos agregados miúdos e metade da água prevista. A betoneira foi então acionada por 1 minuto, a fim de promover a mistura entre a areia e a brita. Então, adicionou-se o cimento e o restante da água. Foram feitos quatro traços sendo o primeiro de referência (sem adição do lodo de esgoto), e os outros três com lodo nas proporções de peso seco 5%, 10% e 15% em substituição parcial da areia. Os traços referentes às misturas bem como o consumo por m³ com relação a/c de 0,57 e 0,65 estão apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3. Para efeito de comparação foi escolhido o mesmo traço de referência da pesquisa realizada com concreto utilizando resíduos de construções e demolições (OLIVEIRA et al, 2007) e cinzas de lodo de esgoto (FONTES,2003).

Tabela 3.2: Traço e consumo do concreto por m³ (a/c=0,57)

Mistura	Traço em massa (1: a:l:b)	Cimento (1) (Kg)	Areia (a) (Kg)	Lodo (l) (Kg)	Brita (b) (Kg)	Água (Kg)
Areia	1: 1,50: 2,50	423,10	634,65	-	1057,75	241,17
Areia + 5 %Lodo	1: 1,51: 0,08: 2,59	371,28	560,63	29,70	961,62	211,63
Areia + 10 % Lodo	1: 1,32: 0,15: 2,47	388,75	513,5	58,31	960,21	221,59
Areia + 15 % Lodo	1: 0,80: 0,14 1,57	395,69	316,55	55,40	621,23	225,54

a - areia; b- brita; l – lodo

Tabela 3.3: Traço e consumo do concreto por m³ (a/c=0,65)

Mistura	Traço em massa (1: a:l:b)	Cimento (1) (Kg)	Areia (a) (Kg)	Lodo (l) (Kg)	Brita (b) (Kg)	Água (Kg)
Areia	1: 2,33: 2,85	342,85	798,84	-	977,12	222,85
Areia+ 5% Lodo	1: 2,21: 0,12: 2,18	343,88	759,97	41,26	749,66	223,52
Areia+10% Lodo	1: 1,44: 0,16: 2,53	384,91	554,27	61,58	973,82	250,19
Areia+15% Lodo	1: 1,08 :0,19: 2,14	419,63	453,20	79,73	898,01	272,76

a - areia; b- brita; l - lodo

3.4.2 Moldagem dos corpos-de-prova

A moldagem dos concretos foi executada em conformidade com a (NBR 1994). Para cada concreto fabricado, foram moldados 09 corpos- de- prova cilíndricos de 0,10 m de diâmetro e 0,20 m de altura. A consistência dos concretos, expressa pela medida do abatimento do tronco de cone - NM 67 /98. O Slump foi mantido constante (90 ± 10 mm), apresentado na Figura 3.8. Na sequência, após um período de 24 horas os corpos- de- prova foram desmoldados e imersos em um tanque com água até completar a idade dos ensaios, 7, 14 e 28 dias.



Figura 3.8 – Ensaio de abatimento do tronco de cone

3.4.3 Realização dos Ensaios

Para realização dos ensaios foram moldados 72 corpos-de-prova, com 0,10 m de diâmetro e 0,20 m de altura. Da quantidade total de corpos-de-prova, 48 foram destinados aos ensaios de resistência à compressão, esclerometria e velocidade ultra-sônica e os 24 restantes, aos ensaios de absorção capilar. Para cada execução dos ensaios se utilizaram dois corpos-de-prova de cada traço e composição, exceto para o ensaio de absorção onde se utilizou três

corpos-de-prova. A finalidade destes é avaliar o desempenho do concreto quanto aos ensaios mecânicos, conforme descrito na Tabela 3.4. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da Universidade Católica de Pernambuco em conformidade com as normas da ABNT: Determinação da resistência à compressão (NBR 1994), Esclerometria (NM- 1986), velocidade de propagação ultra-sônica (NBR 1994a) e Absorção de água por capilaridade (NBR 1995).

Tabela 3.4: Programa experimental do concreto para relação $a/c = 0,57$ e $a/c = 0,65$

Misturas	Ensaio físico e mecânico	Dimensões dos Cp's (cm)	Idade do ensaio (dias)	Nº de Cp's por idade
Areia	Resistência à compressão axial	10x20	7,14 e 28	02
	Índice Esclerométrico	10x20	7,14 e 28	02
	Velocidade ultra-Som	10x20	7,14 e 28	02
	Absorção por capilaridade	10x20	7,14 e 28	03
Areia + 5% lodo	Resistência à compressão axial	10x20	7,14 e 28	02
	Índice Esclerométrico	10x20	7,14 e 28	02
	Velocidade ultra-Som	10x20	7,14 e 28	02
	Absorção por capilaridade	10x20	7,14 e 28	03
Areia + 10% lodo	Resistência à compressão axial	10x20	7,14 e 28	02
	Índice Esclerométrico	10x20	7,14 e 28	02
	Velocidade ultra-Som	10x20	7,14 e 28	02
	Absorção por capilaridade	10x20	7,14 e 28	03
Areia + 15% lodo	Resistência à compressão axial	10x20	7,14 e 28	02
	Índice Esclerométrico	10x20	7,14 e 28	02
	Velocidade ultra-Som	10x20	7,14 e 28	02
	Absorção por capilaridade	10x20	7,14 e 28	03

3.4.3.1 Ensaio de Resistência à Compressão

Observou-se que os corpos-de-prova apresentaram algumas irregularidades na superfície de topo as quais provocam uma distribuição não uniforme da tensão de compressão em determinados pontos, o que poderia interferir nos resultados de resistência. Com o objetivo de se conseguir uma melhor uniformidade nas superfícies, ou seja, torná-las o mais plano possível, foram feitas retificações no topo e base dos corpos-de-prova.

Executada a retificação dos corpos-de-prova, os ensaios foram realizados utilizando uma Máquina Universal de Ensaio – MUE, digital com capacidade para 1000 kN. O corpo - de - prova era colocado diretamente sobre o prato inferior da prensa, de maneira que ficasse

centrado em relação ao eixo de carregamento. Os corpos-de-prova foram rompidos à compressão nas idades de 7, 4 e 28 dias, contadas a partir da hora da moldagem. A resistência à compressão é obtida através da divisão da carga aplicada pela área da seção transversal do corpo-de-prova. A Figura 3.9, ilustra este ensaio.

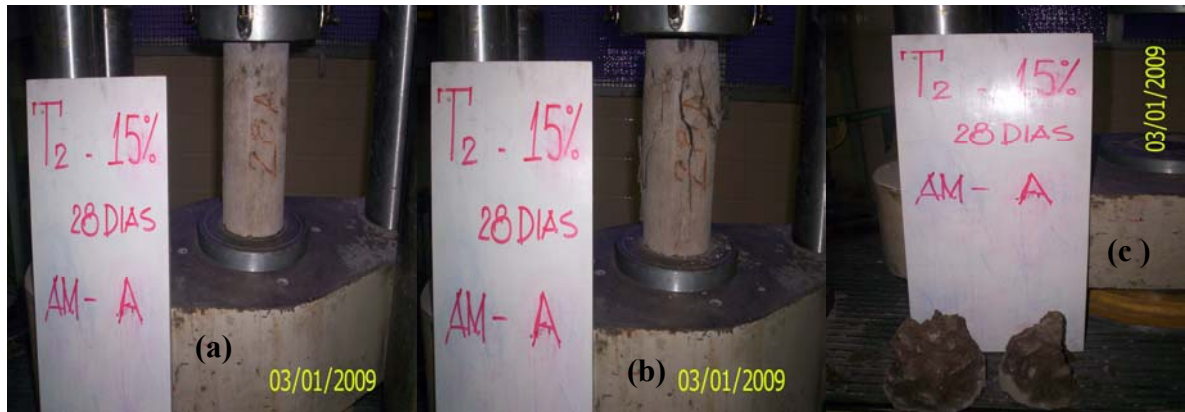


Figura 3.9 - Ensaio de resistência à compressão: (a) corpo-de-prova na prensa; (b) corpo-de-prova rompido; (c) ruptura do corpo-de-prova.

3.4.3.2 Ensaio de Esclerometria

Para realização deste ensaio é escolhida uma área do corpo-de-prova sem irregularidades, onde se traça um reticulado para aplicação do esclerômetro de reflexão sobre a superfície em posição perpendicular, assinalando as leituras em que o impacto tenha quebrado ou fissurado a superfície do concreto. Foram realizadas nove leituras para cada corpo de prova. Calculando-se a média aritmética dos valores de reflexão, determinando-se em seguida o índice esclerométrico, através do qual se obtêm informações a respeito da dureza superficial do concreto.

3.4.3.3 Ensaio de Velocidade ultra – sônica

Após a preparação dos corpos-de-prova, aplica-se uma fina camada de acoplante (vaselina) nas faces dos transdutores ou no corpo-de-prova, com os transdutores nas faces opostas do material, caso a transmissão seja direta. A leitura do tempo é feita em um aparelho P.U.N.D.I.T., equipamento que fornece o tempo decorrido entre a emissão da onda e sua recepção (t) em μs . Conhecendo-se a distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores (L), pode-se calcular a velocidade de propagação das ondas (V), de acordo com a equação (1). A Figura 3.10 ilustra o procedimento deste ensaio.

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Onde:

V= velocidade de propagação de onda (m/s)

L = distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores (m)

t = tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (s).



Figura 3.10– Ensaio velocidade ultra- sônica

3. 4.3.4 Ensaio de Absorção por capilaridade

Decorrido o tempo de cura de 28 dias os corpos-de-prova foram pesados e colocados em uma estufa à temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas e, pesados novamente até chegar à massa constante, segundo os critérios da norma. Depois foram colocados em recipiente fechado com lâmina d'água de 5 ± 1 mm, constante, determinando-se a massa dos corpos-de-prova com 3, 6, 24, 48 e 72 horas contados a partir destes em contato com a água. Sendo então rompidos por compressão diametral, NBR (1994) de modo a permitir a anotação da distribuição da água no seu interior. A Figura 3.11 apresenta algumas etapas do procedimento deste ensaio.

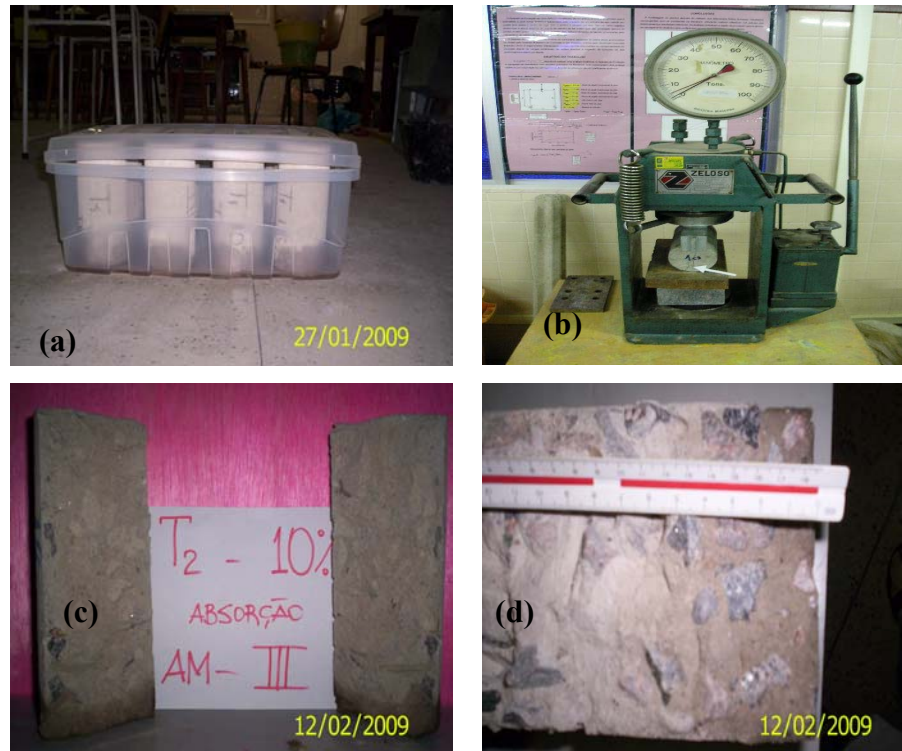


Figura 3.11 - Ensaio de absorção por capilaridade: (a) corpo-de-prova imerso em água; (b) Prensa manual; (c) corpo-de-prova rompido; (d) absorção pelo corpo-de-prova.

A absorção de água por capilaridade, foi calculada com a equação:

$$C = \frac{(A - B)}{S} \quad (2)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade, em g/cm^2

A = massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g;

B = massa do corpo-de-prova seco, assim que este atinge a temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, em g;

S = área da seção transversal, em cm^2 .

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios para caracterização física, química, microestrutural do solo e das misturas solo-lodo da pesquisa e os ensaios mecânicos em diferentes proporções para estudar o uso do lodo no melhoramento do solo e em substituição parcial a areia no concreto.

4.1 Caracterização física do solo, dos lodos e das misturas solo-lodo

Os resultados dos ensaios de caracterização física do solo, dos lodos e das misturas solo-lodo são apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 e nas Figuras 4.1 a 4.3.

Na classificação Pedológica o solo utilizado é um Espodossolo. Amostra do mesmo solo foi separada para os ensaios com o lodo da ETE Mangueira e outra com lodo da ETE Curado. As duas amostras de solo utilizadas apresentam praticamente a mesma granulometria. A primeira amostra tem 92 % de areia, 4 % de silte e 4 % de argila. É uma Areia Siltosa (SM) na Classificação Unificada, não líquido e não plástico e no Sistema de Classificação TRB é classificado como Pedregulhos e Areias Siltosas ou Argilosas (A-2-4). O peso específico real dos grãos é igual a 26 kN/m^3 , tem umidade ótima de 11,90 % e peso específico aparente seco máximo $17,60 \text{ kN/m}^3$, apresentadas na Tabela 4.1 e Figura 4.1a e utilizada nos experimentos com lodo da ETE Mangueira. Na segunda amostra tem 88% de areia, 3 % de silte e 9 % de argila. É uma Areia Siltosa (SM) na Classificação Unificada, não líquido e não plástico e no Sistema de Classificação TRB é classificado como Pedregulhos e Areias Siltosas ou Argilosas (A-2-4). O peso específico real dos grãos é igual a $26,16 \text{ kN/m}^3$, tem umidade ótima de 8,66% e peso específico aparente seco máximo $18,18 \text{ kN/m}^3$, mostrada na Tabela 4.1 e Figura 4.1b e foram utilizados com lodo ETE Curado.

A composição granulométrica do lodo da ETE Mangueira é constituída de 88 % de granulados (com dimensão entre 4,8 mm e 0,1 mm) e 12 % com dimensões menores que 0,1 mm. O lodo da ETE Curado é composto de 96% de granulados (com dimensões entre 4,8 mm

a 0,05 mm) e 4% com dimensões menores que 0,05 mm, com peso específico real dos grãos igual a 16,70 kN/m³.

As misturas do solo com lodo de esgoto da ETE Mangueira são classificadas, também, como Areia Siltosa (SM), não líquido, não plástico. Entretanto, a adição do lodo de esgoto ao solo natural aumentou significativamente a percentagem da fração argila do material, passando de 4 % no solo natural para valores entre 25 e 30 % no solo-lodo. O peso específico real dos grãos no solo-lodo diminuiu um pouco (25 kN/m³), ver Tabela 4.1 e Figura 4.1a. As misturas do solo com lodo de esgoto da ETE Curado nas proporções de 5% e 10% são classificadas, também como Areia Siltosa (SM), não líquido, não plástico. Na proporção de 15% é classificada como uma Areia Siltosa mal graduada (SM-SP), não líquido, não plástico. No Sistema de Classificação TRB são classificados como Pedregulhos e Areias Siltosas ou Argilosas (A-2-4), as misturas nas proporções de 5% e 15%. E a mistura na proporção de 10% é uma Areia Fina (A-3). Os pesos específicos real dos grãos diminuíram (23,99 kN/m³, 23,54 kN/m³ e 22,84 kN/m³) em relação ao solo, ver Tabela 4.1 e Figura 4.1b.

Tabela 4.1– Peso específico real dos grãos e frações do solo, lodo e das misturas solo-lodo

Estação de Tratamento de Esgotos da Mangueira						
Material	Peso Específico real dos grãos (kN/m ³)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação	
					Unificada	TRB
Solo natural	26,00	92	4	4	SM	A-2-4
Lodo	-	88	12	0	-	-
Solo: lodo, 25 Mg ha ⁻¹	25,00	65	9	26	SM	A-2-4
Solo: lodo, 50 Mg ha ⁻¹	25,00	71	4	25	SM	A-2-4
Solo: lodo, 75 Mg ha ⁻¹	25,00	66	4	30	SM	A-2-4
Estação de Tratamento de Esgotos do Curado						
Material	Peso Específico real dos grãos (kN/m ³)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação	
					Unificada	TRB
Solo natural	26,16	88	3	9	SM	A-2-4
Lodo	16,27	96	4	0	-	-
Solo + 5 % lodo	23,99	90	3	7	SM	A-2-4
Solo + 10 % lodo	23,54	92	4	4	SM	A-3
Solo + 15 % lodo	22,84	92	4	4	SM-SP	A-2-4

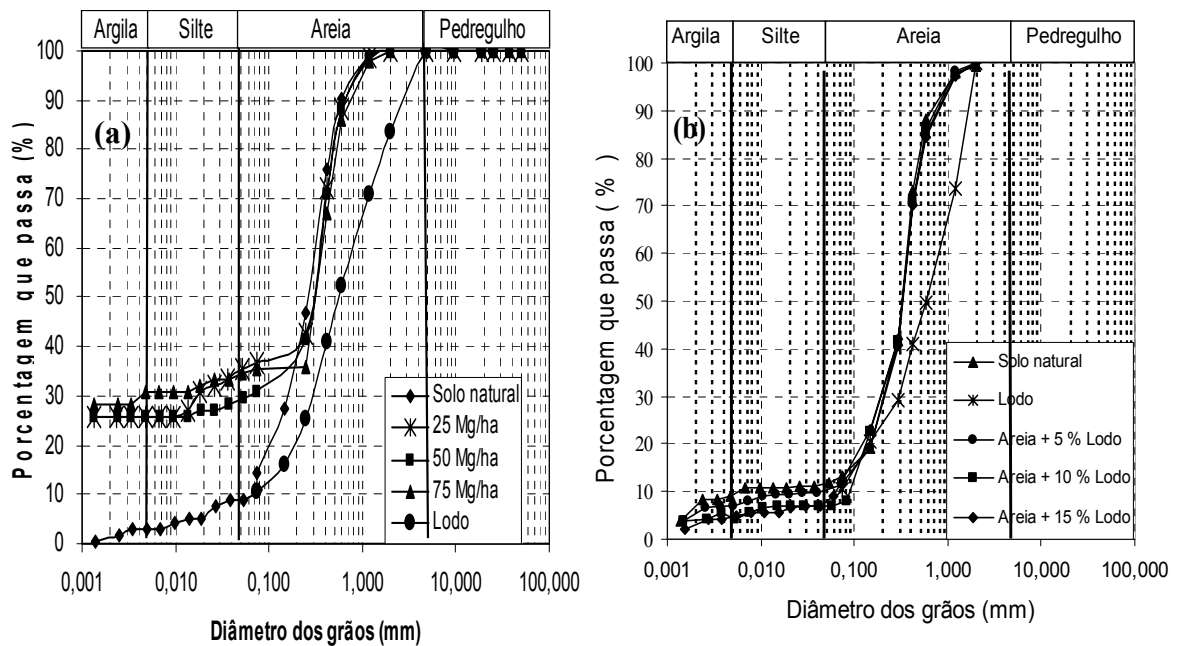


Figura 4.1 Curvas granulométricas – (a) Solo natural, lodo e misturas solo-lodo (25, 50 e 75 Mg ha⁻¹) ETE Mangueira; (b) Solo natural, lodo e misturas solo-lodo 5%, 10% e 15% da ETE Curado.

A Tabela 4.2 mostra os valores das umidades ótimas e dos pesos específico aparente seco máximo do solo e misturas solo-lodo e nas Figuras 4.2.a e 4.2.b são apresentadas as curvas de compactação do solo e misturas solo-lodo e nas Figuras 4.3.a e 4.3.b as curvas da umidade ótima versus peso específico aparente seco máximo, com as proporções de solo lodo.

Tabela 4.2– Índices físicos do solo, lodo e misturas solo – lodo.

Lodo da Estação de Tratamento de Esgotos Mangueira		
Material	Umidade ótima (%)	Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)
Solo natural	11,90	17,60
Solo: lodo, 25 Mg ha ⁻¹	11,80	17,10
Solo: lodo, 50 Mg ha ⁻¹	11,60	17,50
Solo: lodo, 75 Mg ha ⁻¹	12,90	17,50
Lodo da Estação de Tratamento de Esgotos Curado		
Material	Umidade ótima (%)	Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)
Solo natural	8,66	18,18
Areia + 5 % lodo	12,34	17,66
Areia + 10 % lodo	13,38	18,14
Areia + 15 % lodo	12,46	15,85

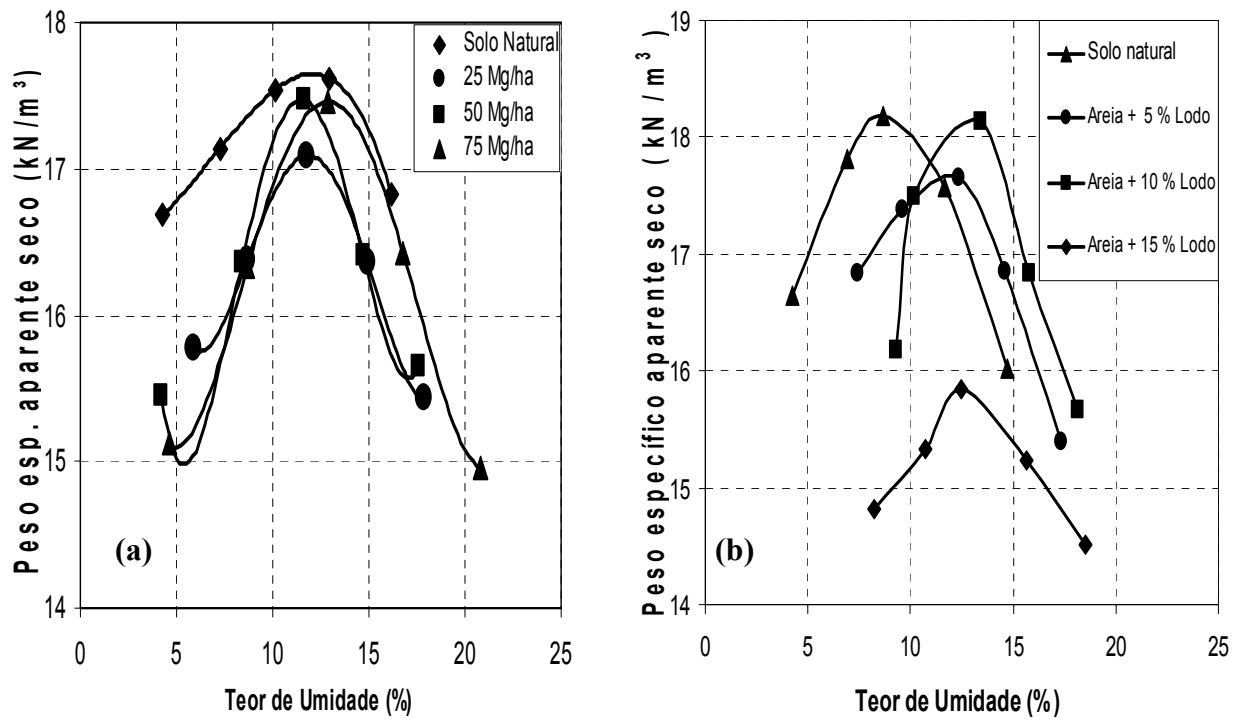


Figura 4.2 – Curvas de Compactação: (a) solo e solo-lodo (25, 50 e 75 Mg ha^{-1}) ETE Mangueira; (b) solo e solo-lodo 5%, 10% e 15% ETE Curado.

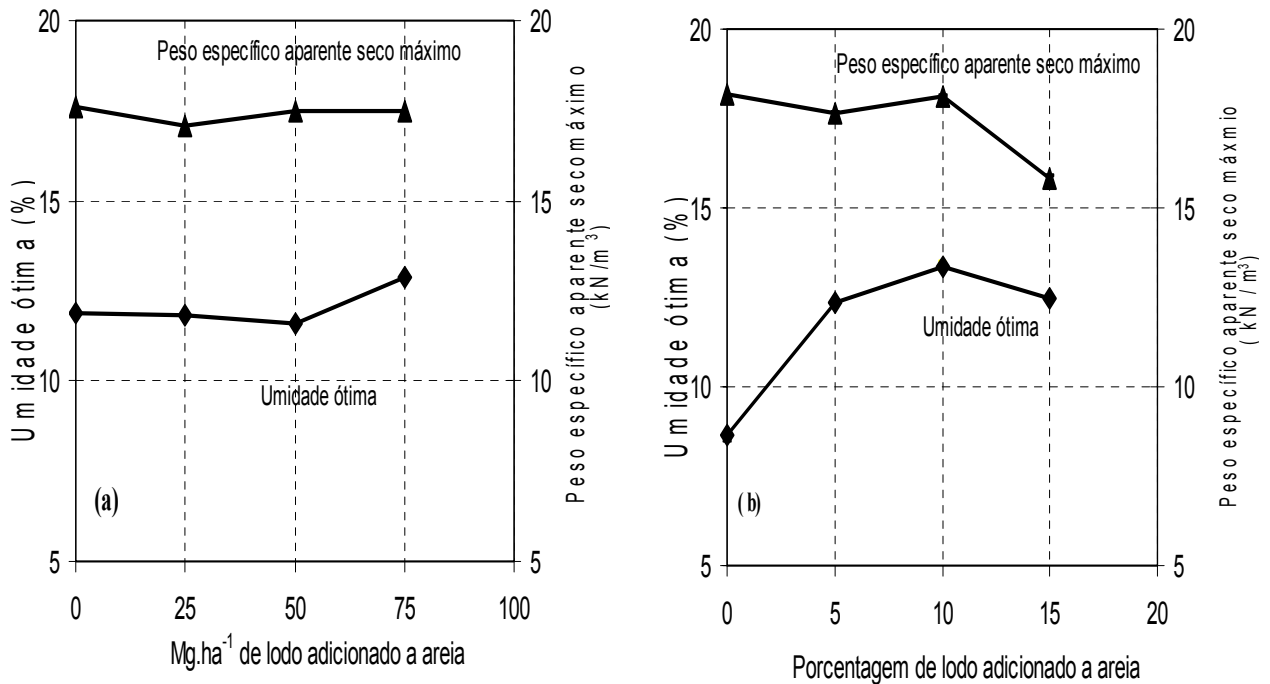


Figura 4.3 – Curva de Mg. ha^{-1} e porcentagem de lodo versus umidade ótima versus peso específico aparente seco máximo: a) solo e solo-lodo (25, 50 e 75 Mg ha^{-1}) ETE Mangueira; (b) solo e solo-lodo (5%, 10% e 15%) ETE Curado.

Pode-se observar na Figura 4.3a que a umidade ótima variou de 11,60 % a 12,90 % e o peso específico aparente seco máximo ficou entre 17,10 e 17,60 kN/m³. Há uma pequena influência da mistura de lodo de esgoto com o solo nestes índices, em relação ao solo natural, porque a quantidade de lodo colocada é pequena. Observando a Figura 4.3b verificamos que há um decréscimo do peso específico aparente máximo com o acréscimo do percentual de lodo exceto para a proporção de 10% e que a umidade ótima cresce com o acréscimo do lodo até 10% e posterior decréscimo. O acréscimo do lodo ao solo diminui o peso específico máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e aumenta a umidade ótima (W_{ot}). A influência do acréscimo do lodo é significativamente superior.

4.2 Ensaio de Mobilidade Química do solo e das misturas solo-lodo ETE Mangueira

Analisando os efeitos físicos nos ensaios de mobilidade química. Observa-se que no solo natural, a umidade na base da coluna experimental é maior do que no topo. A água utilizada não fica retida nos primeiros 0,10 m do solo. Com a adição de lodo ao solo, a água fica armazenada mais na superfície (topo), em quantidade cada vez maior, à medida que a dose de lodo é aumentada, Tabela 4.3. O lodo confere ao solo, maior capacidade de reter água na superfície (Figura 4.4a), em acordo com Melo e Marques (2000), eleva o grau de saturação (Figura 4.4b), aumenta o índice de vazios (Figura 4.4c) e porosidade e diminuem os pesos específicos úmidos e aparentes secos (Figura 4.4d), aspectos esses de fundamental importância para o desenvolvimento das raízes das plantas, e para preservar maior grau de saturação no solo em superfície.

Tabela 4.3. Índices físicos do solo natural e misturas solo-lodo

Material	Umidade (%)		S_r (%)	e	n (%)	γ_h (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)
	Base	Topo					
Solo Natural	22,68	19,49	64,28	0,86	46,07	16,98	14,02
Solo: lodo, 25 Mg ha ⁻¹	22,08	22,17	64,60	0,93	48,14	16,45	13,48
Solo: lodo, 50 Mg ha ⁻¹	27,20	31,86	65,30	1,02	50,39	16,41	12,90
Solo: lodo, 75 Mg ha ⁻¹	25,73	33,54	65,72	1,18	54,07	15,49	11,95

S_r - Grau de saturação; e - Índice de vazios; n - Porosidade; γ_h e γ_d - Peso específico aparente úmido e seco respectivamente.

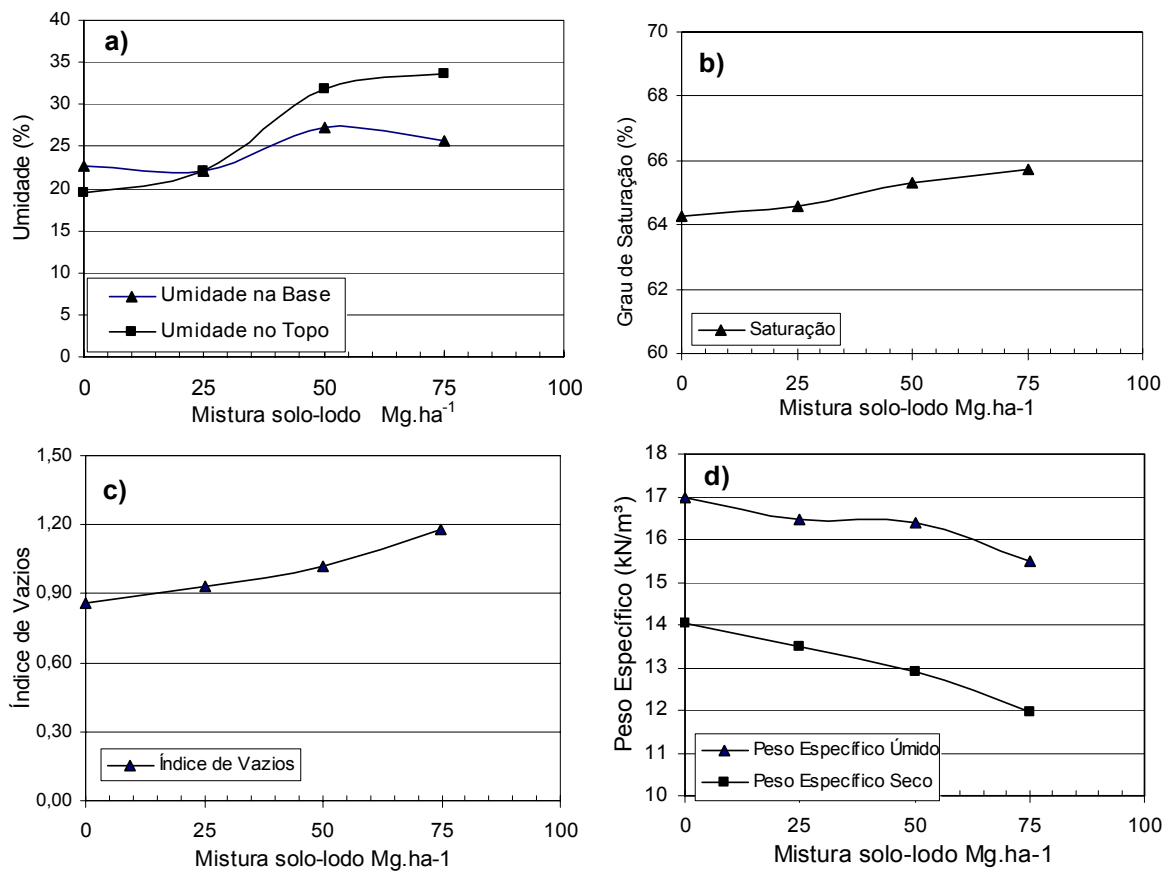


Figura 4.4. Índices físicos do solo natural e das misturas solo-lodo (25, 50 e 75 Mg ha⁻¹) – Lodo ETE Mangueira.

4.3 Análise Micro estrutural do solo e da mistura solo-lodo - ETE Mangueira

A matriz do solo é constituída por intensa quantidade de grãos de areia e pouca argila. Os grãos de areia são quase totalmente de quartzo, sendo de tamanhos variados e formas predominantes arredondadas com menor intensidade de formas angulares (Figura 4.5a). Há uma pequena quantidade de plasma, predominantemente mineral (argila) revestindo parcialmente os grãos do esqueleto (areia), quase sempre não se estendendo ou formando pontes entre eles. Este tipo de contextura condiciona a formação predominante de um tipo de porosidade designada de Poros do Empacotamento Simples segundo BREWER (1976), ou seja, os espaços vazios são resultantes da junção de partículas de diferentes tamanhos e formas. O lodo é constituído por granulados de diferentes formas que se conectam diretamente ou por meio de fibras (Figura 4.5b). À medida que se aumenta a quantidade de lodo no solo natural, os grãos de areia são progressivamente revestidos pelo LE reduzindo o contato direto entre os grãos de quartzo, o lodo ocupa os espaços vazios (Figura 4.5c, 4.5d, e 4.5e), ocupando o volume do ar.

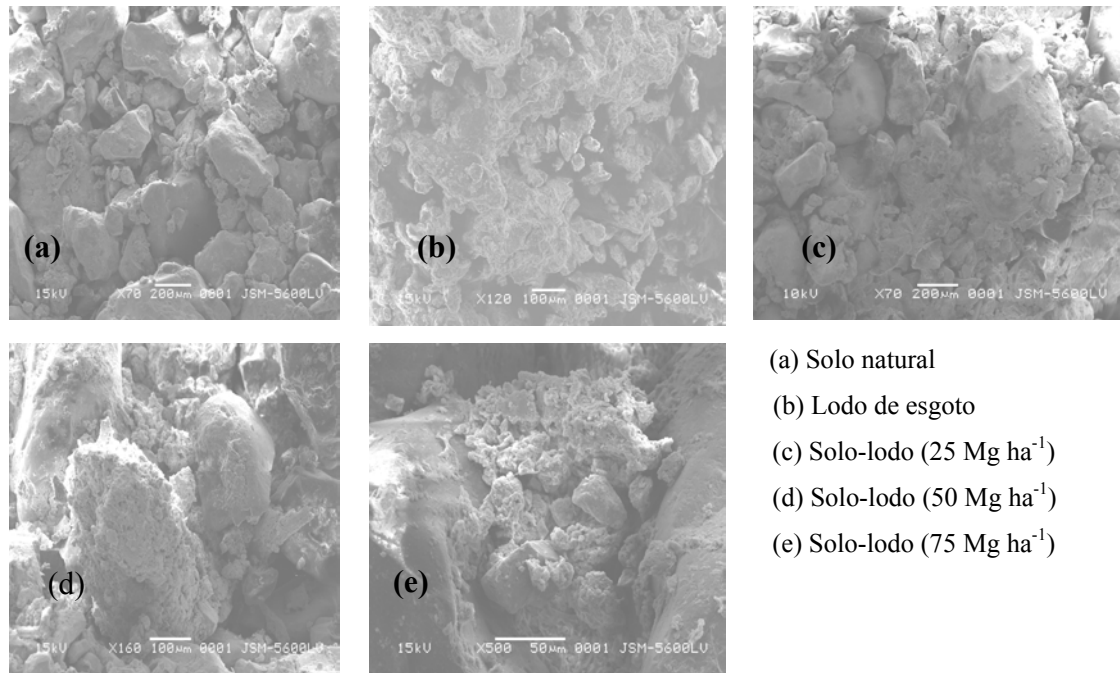


Figura 4.5 Eletromicrografia da textura do solo, lodo e das misturas solo-lodo – ETE Mangueira

4.4 Condutividade Hidráulica

No solo natural a condutividade hidráulica decresce com o acréscimo da tensão confinante de valores que variaram de $4,8 \times 10^{-4}$ m/s a $1,7 \times 10^{-4}$ m/s. A adição do lodo de esgoto ao solo natural causa uma redução na condutividade hidráulica, Figura 4.6. A redução é de 60 % para a dose equivalente a 75 Mg ha^{-1} . O efeito do acréscimo do lodo ao solo natural causa uma redução na condutividade hidráulica equivalente a um acréscimo de 50 kPa de tensão confinante.

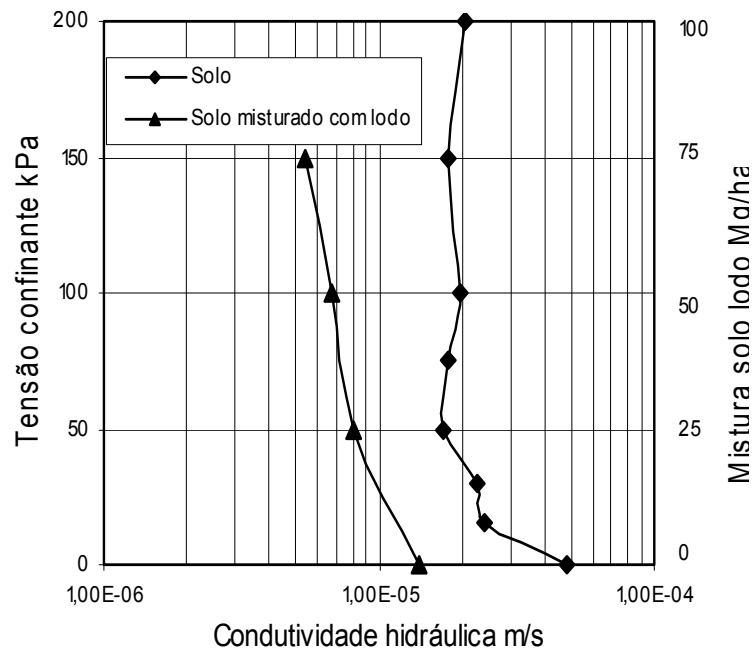


Figura 4.6 Condutividade hidráulica do solo e das misturas solo-lodo – ETE Mangueira

4.5 Caracterização química do solo, lodo e da mistura solo-lodo

a) Utilizando o lodo da Estação de Tratamento de Esgotos da Mangueira.

A caracterização química do solo, lodo da ETE Mangueira e das misturas solo-lodo nas doses equivalentes a zero, 25, 50 e 75 Mg ha⁻¹, realizados após os ensaios de mobilização química por Silva (2007) e coletados após 60 dias de lixiviação, divididos em topo (camada de 0 a 0,10 m) e base (camada de 0,10 a 0,20 m do solo), e apresentada na Tabela 4.4. O pH determinado em água é ácido (pH < 7). No solo natural a capacidade de troca catiônica do solo é baixa (CTC = 5,7 cmol_cdm⁻³) apresentando atividade baixa (Tb), típica do argilo-mineral caulinita. Ao adicionar lodo ao solo ocorre acréscimo dos teores de fósforo, potássio e sódio; sendo maior no topo do que na base. O teor de fósforo encontrado no solo é considerado baixo, sendo observado o seu aumento com a adição de lodo de esgoto. Segundo Tomé Jr (1997), independente do tipo de solo, serão baixos os teores de fósforo, menores que 3 mg kg⁻¹ e altos os teores de fósforo acima de 30 mg kg⁻¹.

Tabela 4.4. Caracterização química do solo, lodo e da mistura solo-lodo – ETE da Mangueira

Amostra	Atributo							
	K ⁺ cmol _c dm ⁻³	Na ⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ⁺⁺ cmol _c dm ⁻³	Ca ⁺⁺ cmol _c dm ⁻³	Al ⁺⁺⁺ cmol _c dm ⁻³	P mg kg ⁻¹	N mg kg ⁻¹	
Solo (inicial)	0,15	0,08	0,55	3,4	0,00	20,00	-	
Solo	Topo*	2,67	67,67	1,14	3,01	1,84	3,05	1,12
	Base*	3,33	67,67	0,97	3,16	1,58	2,87	1,91
Mistura Solo-Lodo	2100	300	1200	9400	-	45000	-	
25 Mg ha ⁻¹	Topo*	2,33	68,00	0,13	3,08	1,81	5,53	0,53
	Base*	2,33	60,00	0,13	3,28	0,90	3,26	0,76
50 Mg ha ⁻¹	Topo*	12,33	72,67	0,20	3,31	1,41	7,33	1,02
	Base*	2,33	69,00	0,13	3,18	1,37	4,19	1,32
75 Mg ha ⁻¹	Topo*	12,00	67,33	0,67	3,14	1,51	9,05	1,09
	Base*	3,33	66,67	0,54	3,24	1,48	2,99	1,12

b) Utilizando o lodo da Estação de Tratamento de Esgotos do Curado

A caracterização química do solo, lodo ETE Curado e das misturas solo-lodo nas proporções em peso de 5, 10 e 15 %, onde foram realizadas as determinações como descrito no Item 3, é apresentada na Tabela 4.5.

O solo natural é ácido ($\text{pH} < 7$). O pH de um solo não constitui um valor constante e característico como em soluções aquosas. O valor do pH em Cloreto de Potássio (pH_{KCl}) é inferior ao valor do pH em água ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) e a variação do pH ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) é negativa, indicando a presença de argilas silicatadas, Carvalho (2004). A quantidade da matéria orgânica obtida a partir do carbono orgânico é baixa (menor que 1,0 %). A capacidade de troca catiônica é baixa (valor $T = \text{CTC} < 27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), indicando também a predominância do mineral argílico caulinita. A Saturação por base expressa em porcentagem (valor V) é inferior a 50 % tratando-se de um solo Distrófico. A porcentagem de sódio no complexo de trocável ($100 \text{ Na}^+ \text{ T}^{-1}$) de 2,3% é baixa (2,3 %) inferior a 6 %. A condutividade elétrica do extrato de saturação é alta ($10 \text{ mS/cm/25}^\circ\text{C}$) superior a $4 \text{ mS/cm/25}^\circ\text{C}$.

Tabela 4.5 Caracterização química do solo, lodo e da mistura solo-lodo – ETE Curado

Determinação	unidade	Solo areia	Lodo	Mistura solo - lodo		
				5%	10%	15%
pH em água	-	6,08	7,22	6,9	7,01	7,13
pH em KCl	-	6,00	7,30	7,06	7,15	7,18
Carbono Orgânico	g/Kg	1,07	14,29	8,60	9,67	11,46
Matéria Orgânica	g/kg	1,85	24,64	14,82	16,67	19,76
Mg ⁺⁺ trocável	cmol _c /kg	3,30	11,00	3,00	0,20	1,50
Na ⁺ trocável	cmol _c /kg	0,30	185,80	10,40	22,30	26,90
K ⁺ trocável	cmol _c /kg	0,20	18,40	1,30	1,90	2,20
H ⁺ + Al ⁺⁺⁺ extraível	cmol _c /kg	8,10	8,90	6,01	6,67	7,37
Hidrogênio extraível (H ⁺)	cmol _c /kg	7,70	8,80	5,71	6,27	6,95
Valor de V (% Sat. de Base)	%	0,38	0,97	0,76	0,83	0,86
% Fe ₂ O ₃ no Ext. Sulfurico	g/kg	0,50	2,25	0,63	0,75	0,88
% Al ₂ O ₃ no Ext. Sulfurico	g/kg	1,50	3,30	1,50	3,20	3,40
Cond. Elétrica no ext. sat.	mS/cm/25°C	10	9769	2708	3670	5940
Superfície específica	m ² /g	18,40	14,70	3,70	11,00	11,00

A medida que se adicionar lodo ao solo de 5 a 15%, as misturas assim formadas apresentam pH praticamente neutro (aproximadamente 7), o teor de matéria orgânica cresce mas ainda é baixo, a capacidade de troca catiônica cresce e a partir da proporção de 10 % a mistura passa a ter uma CTC, alta (valor T = CTC > 27cmol_ckg⁻¹). A saturação por alumínio decresce e a saturação por sódio, a quantidade de água no extrato saturado e a condutividade elétrica do extrato de saturação crescem quando se aumenta a proporção de lodo ao solo.

4.6 Análise da Compressibilidade

Os valores dos índices de vazios, das deformações volumétricas e dos potenciais de colapsos obtidos pelos ensaios edométricos convencionais são mostrados neste item. Os resultados dos ensaios edométricos estão representados com gráficos típicos, que relaciona índice de vazios (e) e deformação volumétrica específica (ϵ_v), em escala linear, com a tensão vertical de consolidação (σ_v), em escala logarítmica. São apresentadas, também, as curvas da variação do potencial de colapso (ϵ_c), em percentual, com a tensão vertical de consolidação (σ_v), em escala logarítmica. para os ensaios edométricos simples.

4.6.1 Ensaio Edométricos

4.6.1.1 Ensaio Edométricos Simples

Os ensaios edométricos simples foram realizados objetivando a determinação das deformações de colapso (ϵ_c) sob diferentes tensões de inundação (σ_{vi}). Os Índices físicos, iniciais e finais, das amostras utilizadas nos ensaios edométricos simples com pesos específicos aparentes secos de 15,00 kN/m³ e 17,00 kN/m³ são mostrados nas Tabelas A.1 a A.4 e A.5 a A.8, respectivamente no anexo A. O processo de compactação e o controle de umidade permitiram obter corpos de prova, com pesos específicos aparente secos e umidades muito próximos dos desejados bem como a repetitividade dos resultados.

Os gráficos, índice de vazios versus tensão vertical de consolidação ($e \times \sigma_v \log$), deformação volumétrica específica versus tensão vertical de consolidação ($\epsilon_v \times \sigma_v \log$), do solo e misturas solo-lodo inundadas com água destilada com os pesos específicos aparentes secos de 15,00 kN/m³ e 17,00 kN/m³ são mostrados nas Figuras 4.7 a 4.10.

Os valores dos potenciais de colapso, foram calculados através da fórmula (2), para a tensões verticais de inundação de 10, 20, 40, 80,160, 320 e 640 kPa, dos ensaios edométricos simples, com amostras compactadas para os pesos específicos de 15,00 kN/m³ e 17,00 kN/m³, são apresentadas na Tabela 4.6. A variação do potencial de colapso com a tensão vertical de consolidação ($\epsilon_c \times \sigma_v \log$) do solo inundado com diferentes proporções de lodo são mostradas nas Figuras 4.11 e 4.12.

$$CP(\%) = 100 \times \frac{\Delta H}{H_i} \quad (3)$$

Onde: ΔH é a variação da altura do corpo de prova devido à inundação (mm)

H_i é a altura do corpo de prova antes da inundação (mm)

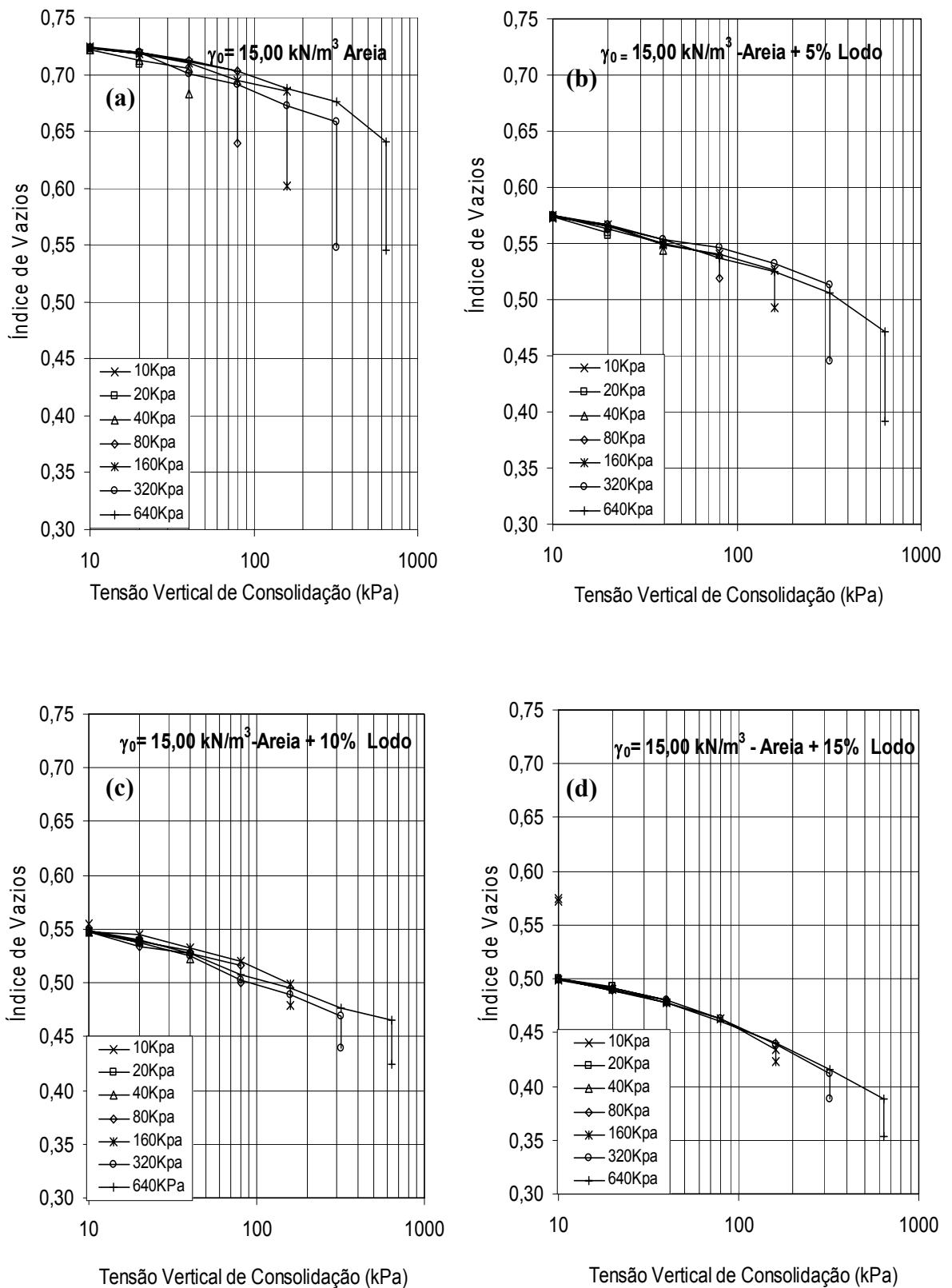


Figura 4.7-Índice de vazios x tensão vertical de consolidação em ensaios edométrico simples para peso específico aparente seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$: a) areia b) areia 5% de lodo, c) areia 10% de lodo, d) areia 15% de lodo.

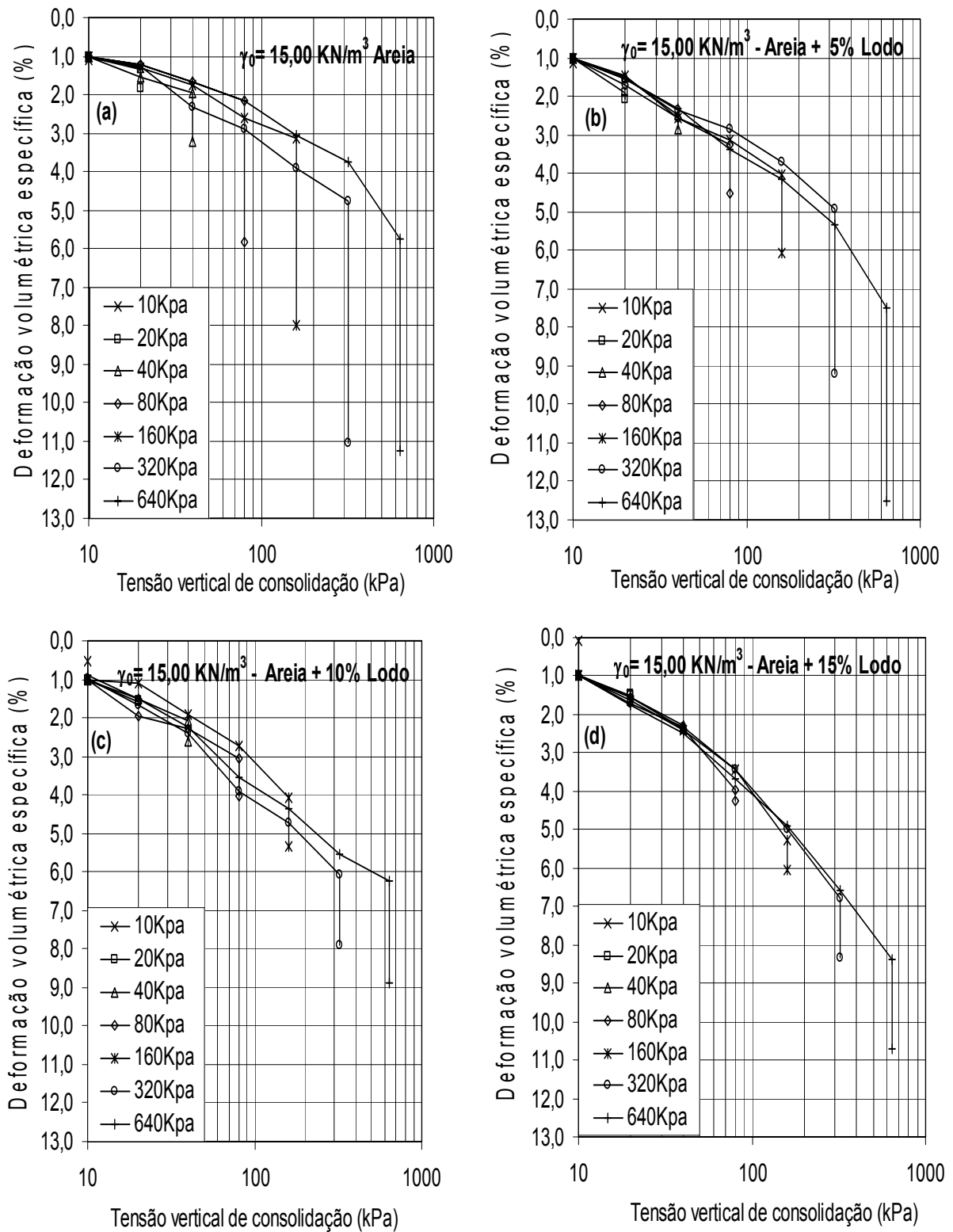


Figura 4.8 – Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação em ensaios edométricos simples para peso específico aparente seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$: a) areia b) areia 5% de lodo, c) areia 10% de lodo, d) areia 15% de lodo

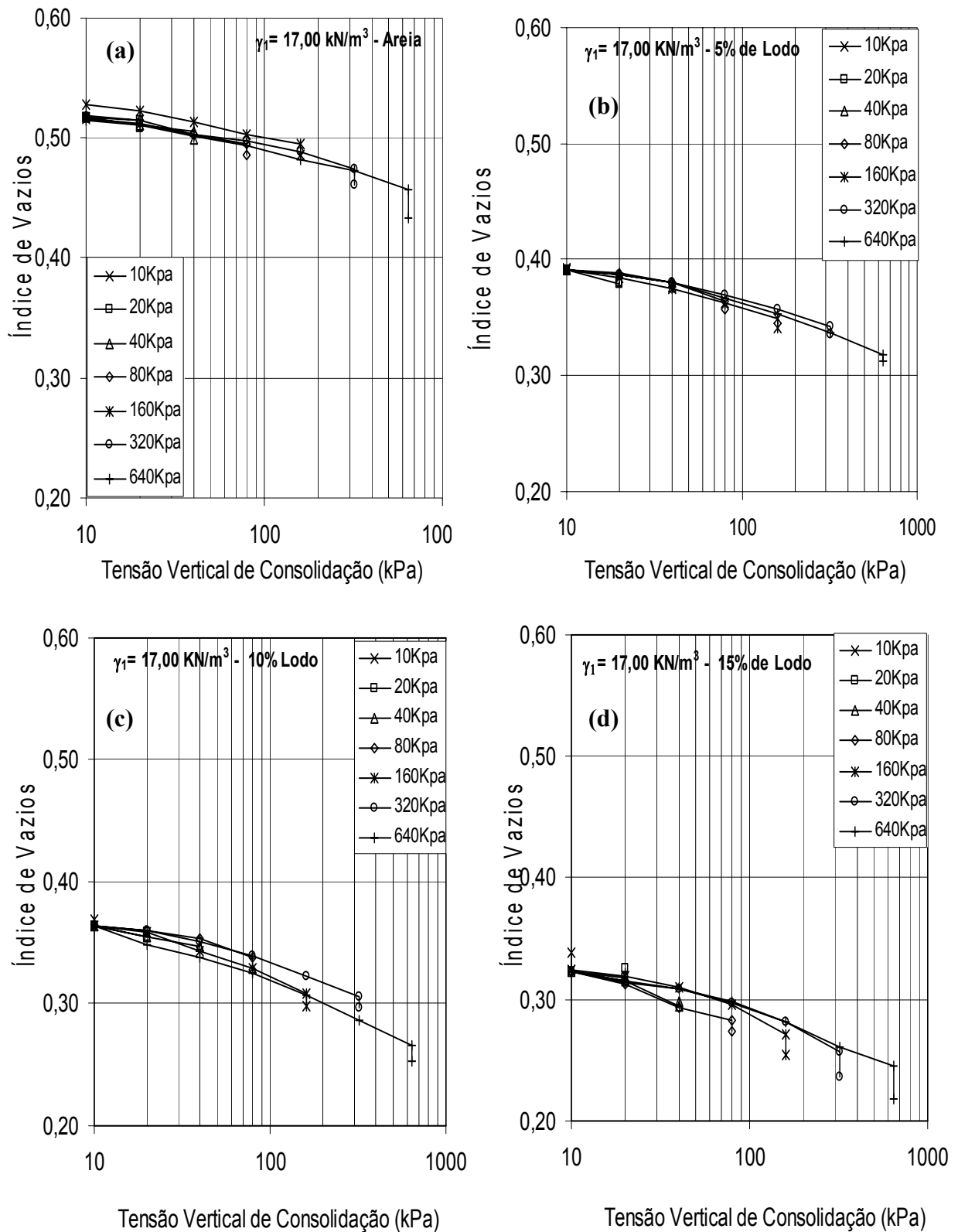


Figura 4.9—Índice de vazios x tensão vertical de consolidação em ensaios edométrico simples para peso específico aparente seco de $17,00 \text{ kN/m}^3$: a) areia b) areia 5% de lodo, c) areia 10% de lodo, d) areia 15% de lodo

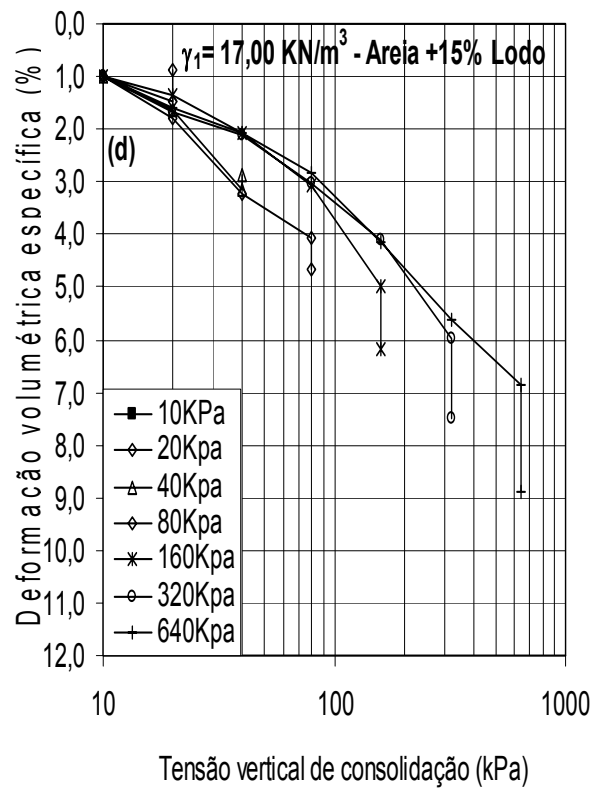
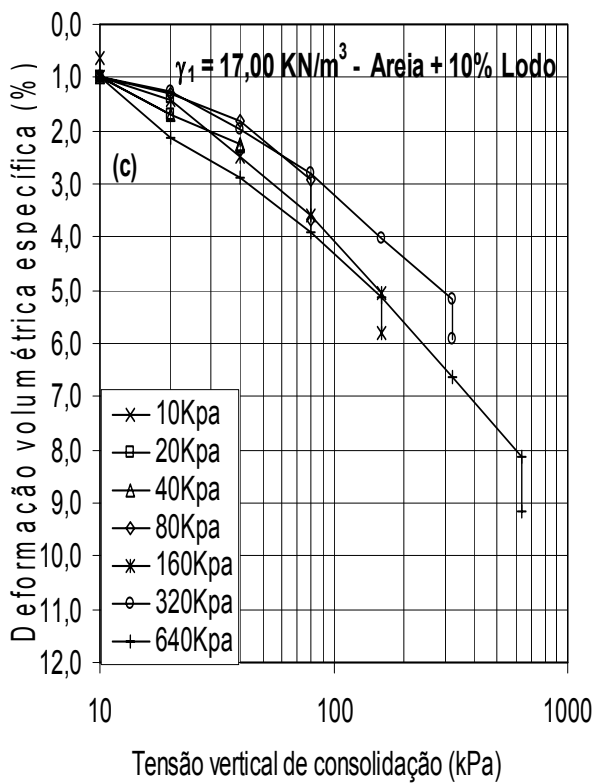
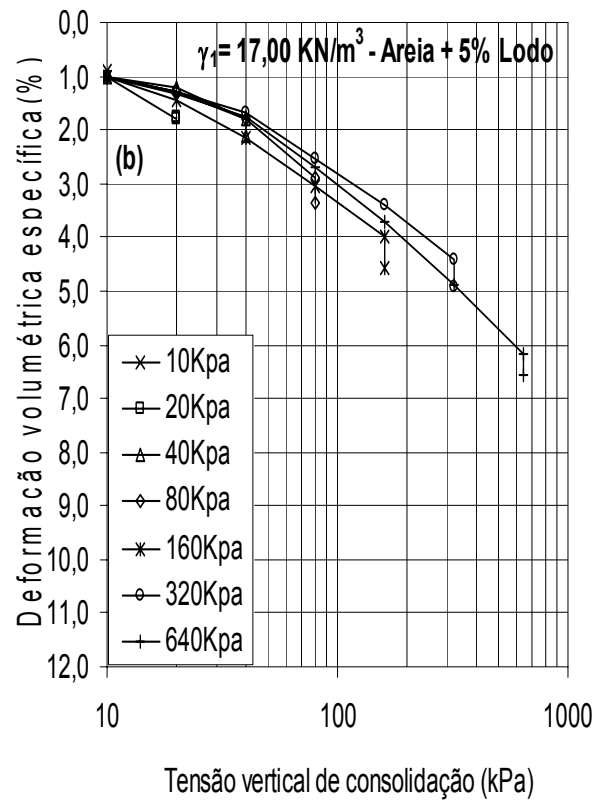
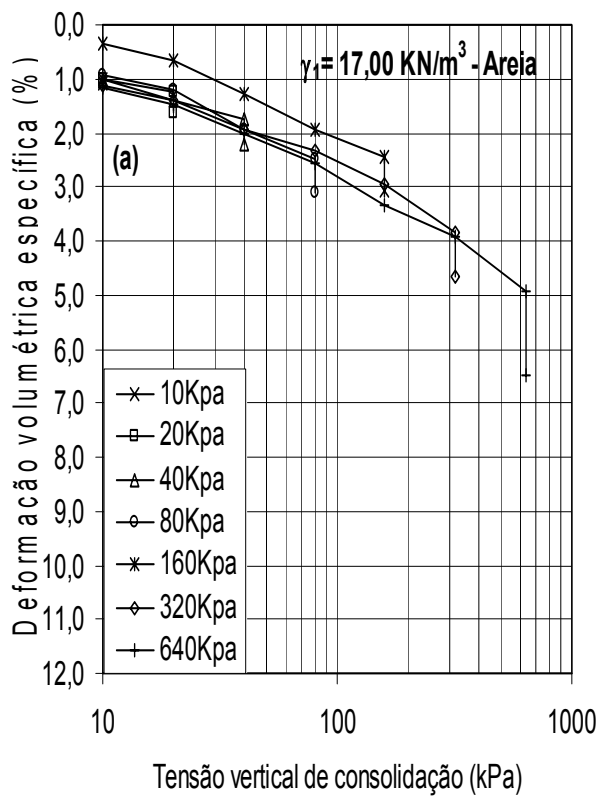


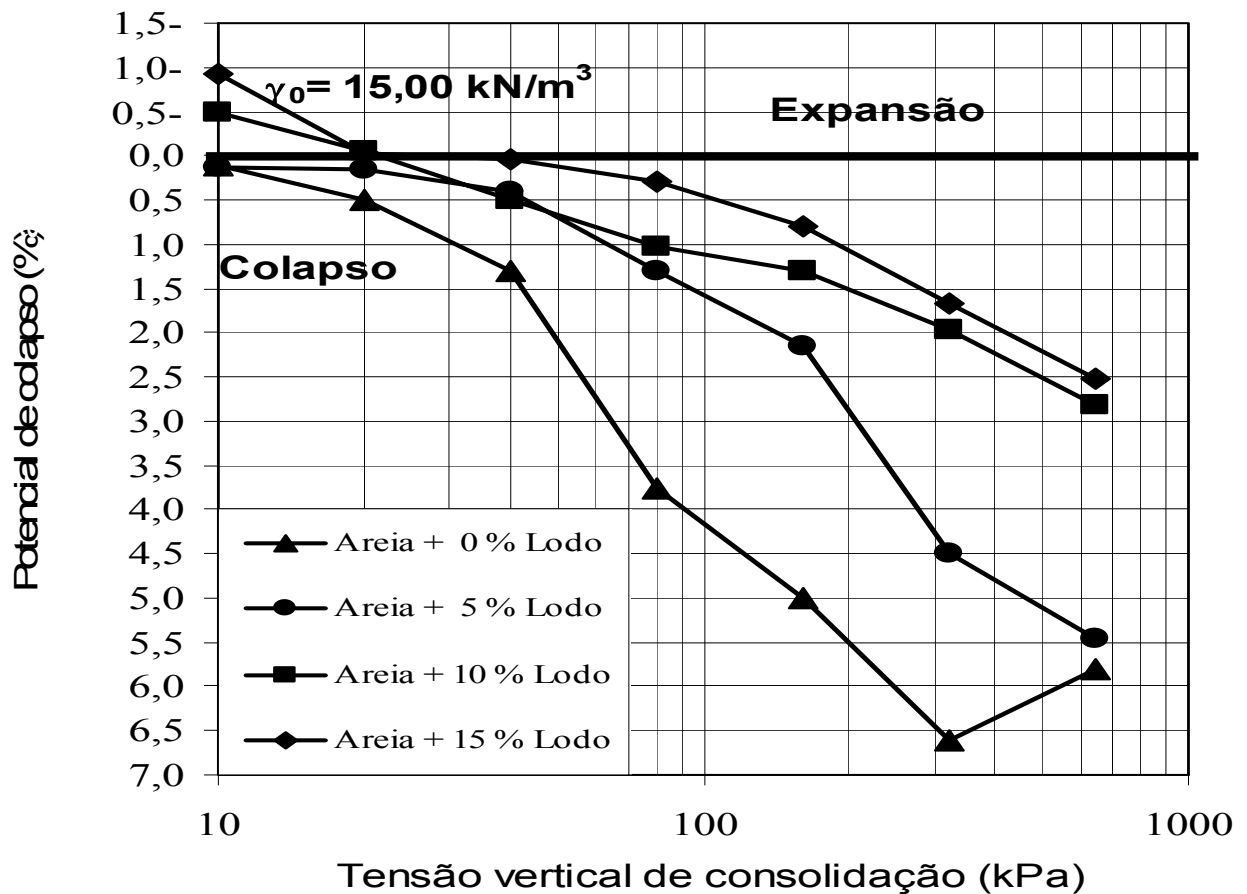
Figura 4.10– Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação em ensaios edométricos simples para peso específico aparente seco de $17,00 \text{ kN/m}^3$: a) areia b) areia 5% de lodo, c) areia 10% de lodo, d) areia 15% de lodo.

Tabela 4.6- Potenciais de colapso dos ensaios edométricos simples

 $(\gamma_s = 15,00 \text{ kN/m}^3 \text{ e } \gamma_s = 17,00 \text{ kN/m}^3)$

Tensão de Inundação (kPa)	Potencial de colapso - CP (%)							
	Peso específico seco $15,00 \text{ kN/m}^3$				Peso específico seco $17,00 \text{ kN/m}^3$			
	Amostras				Amostras			
	0% lodo	5% lodo	10% lodo	15% lodo	0% lodo	5% lodo	10% lodo	15% lodo
10	0,11	0,13	-0,49	-0,92	0,11	-0,11	-0,37	-1,12
20	0,50	0,16	-0,06	-0,04	0,41	-0,05	-0,29	-0,60
40	1,30	0,40	0,52	0,05	0,45	0,32	0,02	-0,31
80	3,75	1,30	1,03	0,29	0,61	0,49	0,76	0,65
160	4,99	2,15	1,30	0,80	0,63	0,63	0,78	1,26
320	6,61	4,50	1,96	1,67	0,88	0,53	0,79	1,61
640	5,81	5,45	2,81	2,53	1,64	0,41	1,08	2,21

expansão (-); colapso (+)


 Figura 4.11– Potencial de colapso x tensão vertical de consolidação em ensaios edométrico simples para peso específico aparente seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$: a) areia b) areia 5% lodo, c) areia 10% lodo, d) areia 15% lodo

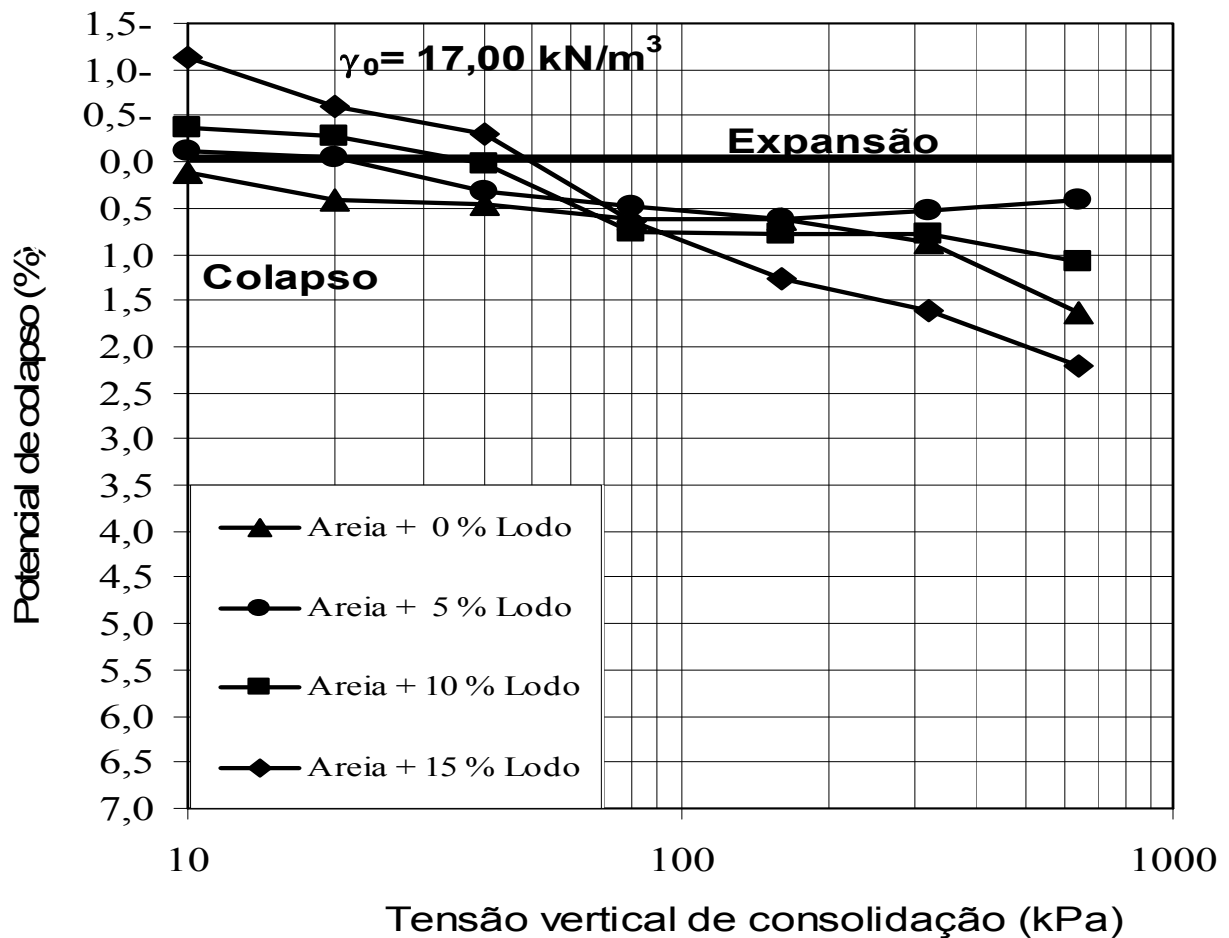


Figura 4.12 - Potencial de colapso x tensão vertical de consolidação em ensaios edométrico simples para peso específico aparente seco de $17,00 \text{ kN/m}^3$: a) areia b) areia 5% de lodo, c) areia 10% de lodo, d) areia 15% de lodo.

No solo sem acréscimo de lodo para o peso específico seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$, o colapso aumenta atingindo um valor máximo de 6,61 % na tensão de 320 kPa e depois decresce. Sendo esta a tensão crítica para o colapso máximo. A compactação do solo para peso específico de $17,00 \text{ kN/m}^3$ reduziu significativamente os potenciais de colapso a valores máximos de 1,64 % para a tensão de 640 kPa.

O acréscimo de lodo ao solo diminui o potencial de colapso. Para o peso específico seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$ e tensão de 10 kPa, o acréscimo de lodo de 10 % e 15 % ao solo causou uma pequena expansão. Comportamento similar foi observado para o peso específico seco de $17,00 \text{ kN/m}^3$ nas tensões de 10 kPa, 20 kPa com acréscimo de lodo de 10 % e 15 %.

Foi calculada a média dos índices físicos iniciais dos oito corpos de prova do solo de cada mistura do solo-lodo e de cada peso específico aparente seco. A partir dos valores médios dos índices físicos foi calculado, o percentual de volume de cada componente da mistura em percentual correspondente ao solo, ao lodo, a água e ao ar. Os valores são apresentados na Tabela 4.7 e na Figura 4.13.

O acréscimo do lodo funciona com eficiência na redução do colapso, semelhante ao aumento do peso específico. Para o peso específico de $15,00 \text{ kN/m}^3$ a redução do colapso do solo natural em relação aos acréscimos de lodo em 5 %, 10 % e 15 % foram de 6,2 %, 51,6 % e 56,4 %, respectivamente.

Tabela 4.7 – Porcentagem de volume de cada componente da mistura

Amostra	Porcentagem de volume							
	Peso específico aparente seco (15 kN/m^3)				Peso específico aparente seco (17 kN/m^3)			
	Sólido	Lodo	Água	Ar	Sólido	Lodo	Água	Ar
Areia	57,44	0,00	7,46	35,10	65,23	0,00	8,18	26,59
Areia + 5 % lodo	48,45	14,42	7,41	29,71	54,85	16,33	8,61	20,21
Areia + 10 % lodo	46,26	17,72	7,61	28,40	52,47	20,10	8,61	18,82
Areia + 15 % lodo	42,84	23,17	7,39	26,61	48,55	26,25	8,60	16,60

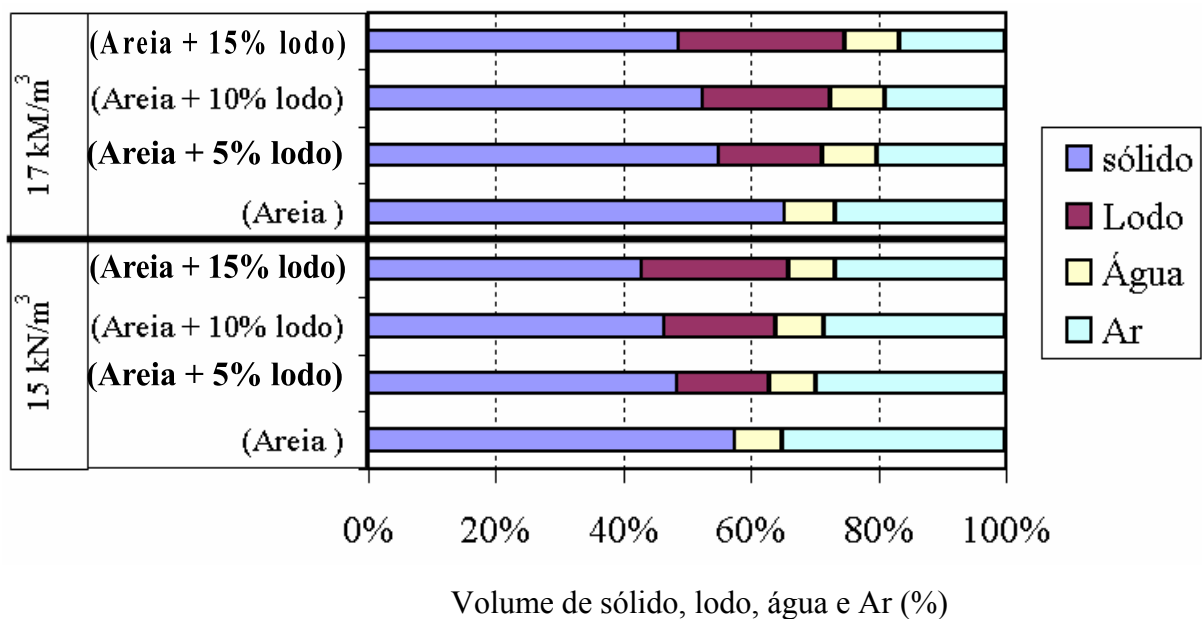


Figura 4.13 – Porcentagem de volume de cada componente da mistura

Para um mesmo peso específico aparente seco o acréscimo de lodo aumenta o volume das partículas sólidas e reduz o volume de vazios. Como o volume de água teve pequenas variações, a redução que ocorre no volume de vazios é devido à redução do volume de ar. Por outro lado o aumento de volume que ocorre de partículas sólidas na mistura em relação ao solo natural é significativamente influenciado pela diferença do peso específico real dos grãos do solo ($26,16 \text{ kN/m}^3$) quando comparado com o lodo ($16,27 \text{ kN/m}^3$). Portanto para um mesmo peso específico aparente seco o acréscimo do lodo ao solo aumenta o número de partículas nos contatos entre os grãos, reduzindo os poros e dá maior estabilidade a estrutura do solo, reduzindo o colapso. Isto foi mostrado através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura descrito no item 4.3.

4.6.1.2 Ensaio Edométrico Duplo

Os ensaios edométricos duplos foram realizados com o solo e as misturas solo-lodo compactados com peso específico seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$ e $17,00 \text{ kN/m}^3$. Os índices físicos, iniciais e finais, das amostras utilizadas nos ensaios edométricos duplos são apresentados nas Tabelas A.9 e A.10 do apêndice A. Os gráficos, índice de vazios versus tensão vertical de consolidação ($e \times \sigma_v \log$), e deformação volumétrica específica versus tensão vertical de consolidação ($\epsilon_v \times \sigma_v \log$), obtidos nos ensaios em amostras dos solos na umidade natural (constante), e inundados, são mostrados nas Figuras 4.14 a 4.17 (utilizando como líquido de inundação água destilada).

A partir dos resultados dos ensaios edométricos duplos, foram determinados os índices de compressão (C_c), o índice de expansão (C_s), e a tensão de pré – consolidação do solo e das misturas solo-lodo, apresentados na Tabela 4.8 e 4.9. Observa-se que os parâmetros obtidos a partir dos ensaios na umidade natural foram inferiores aos obtidos a partir dos ensaios inundados. Para o peso específico seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$ a compressibilidade na condição natural e inundado cresce com o acréscimo de lodo até 5 % e decresce posteriormente com o acréscimo do percentual de lodo.

Para o peso específico aparente seco de 15 kN/m^3 a tensão de pré-consolidação no solo não inundado aumenta com o acréscimo do lodo ao solo até a 5% e posteriormente decresce. Já no solo inundado a tensão de pré-consolidação cresce com o acréscimo do lodo ao solo até a 10% e posteriormente diminui.

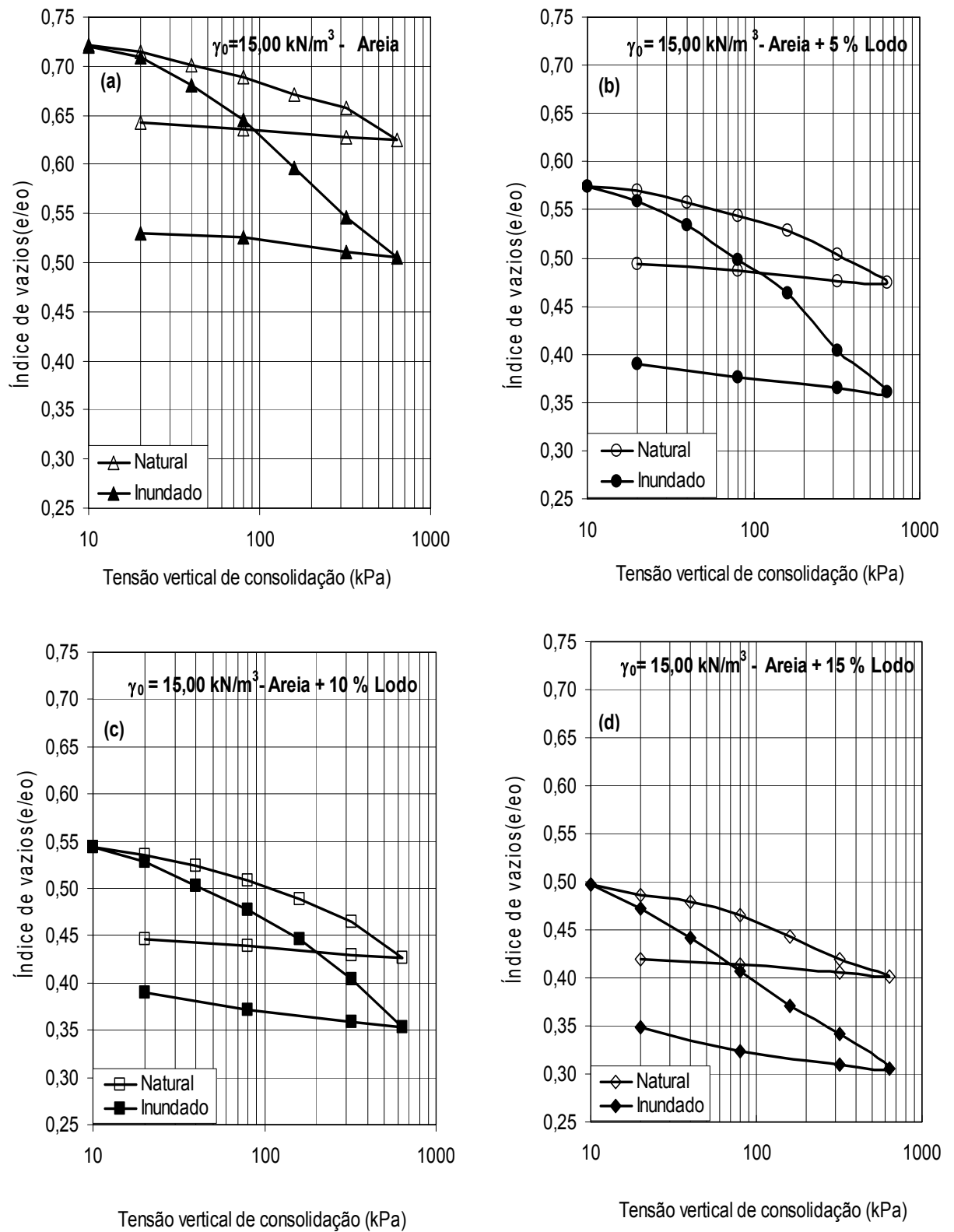


Figura 4.14– Índice de vazios x tensão vertical de consolidação em ensaios edométricos duplos para peso específico aparente seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$: a) areia b) areia 5% de lodo, c) areia 10% de lodo, d) areia 15% de lodo.

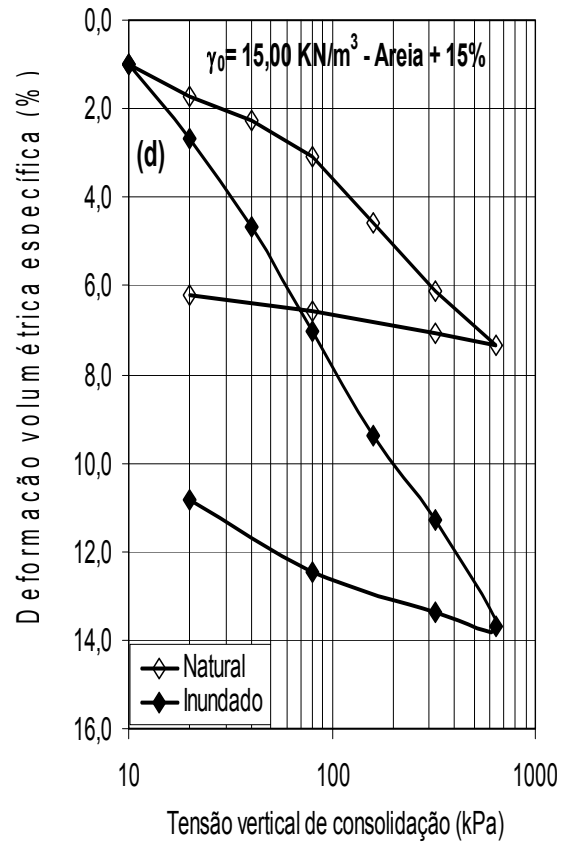
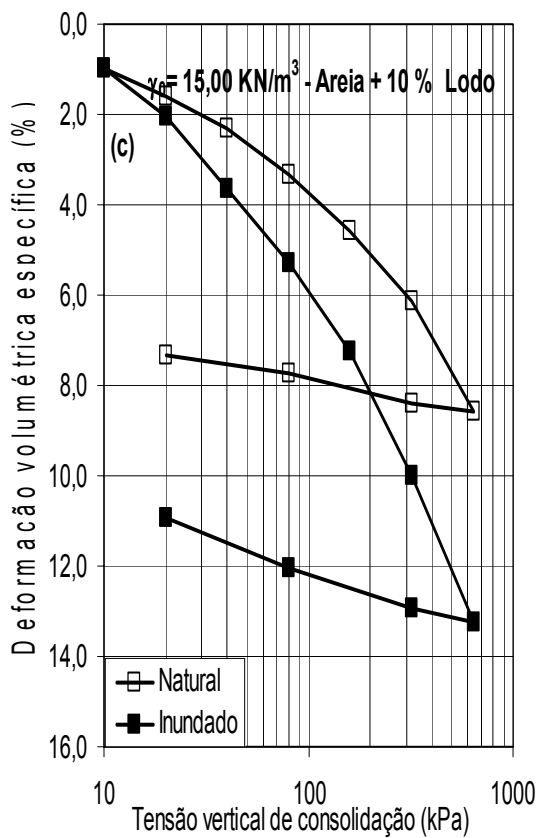
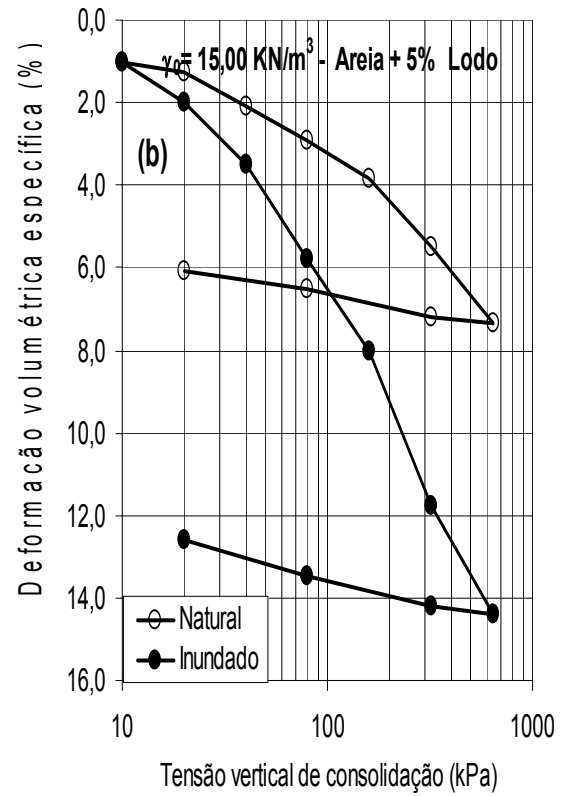
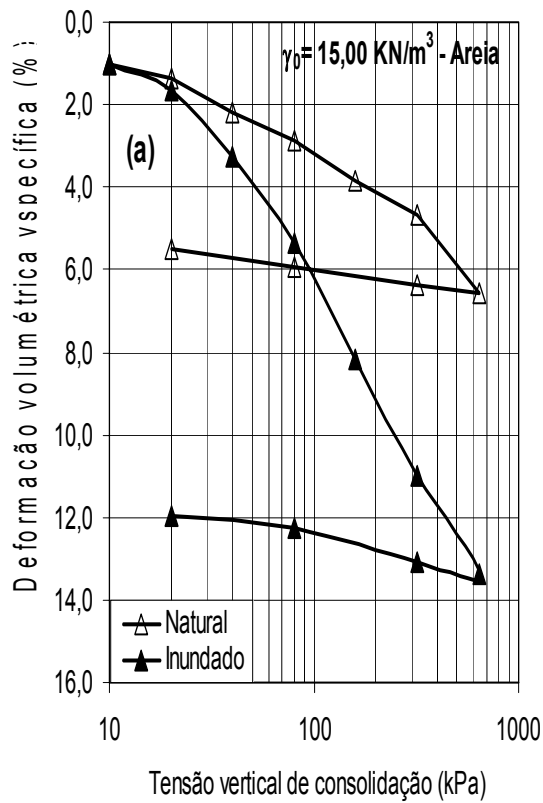


Figura 4.15– Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação em ensaios edométricos duplos para peso específico aparente seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$: a) areia b) areia 5% de lodo, c) areia 10% de lodo, d) areia 15% de lodo.

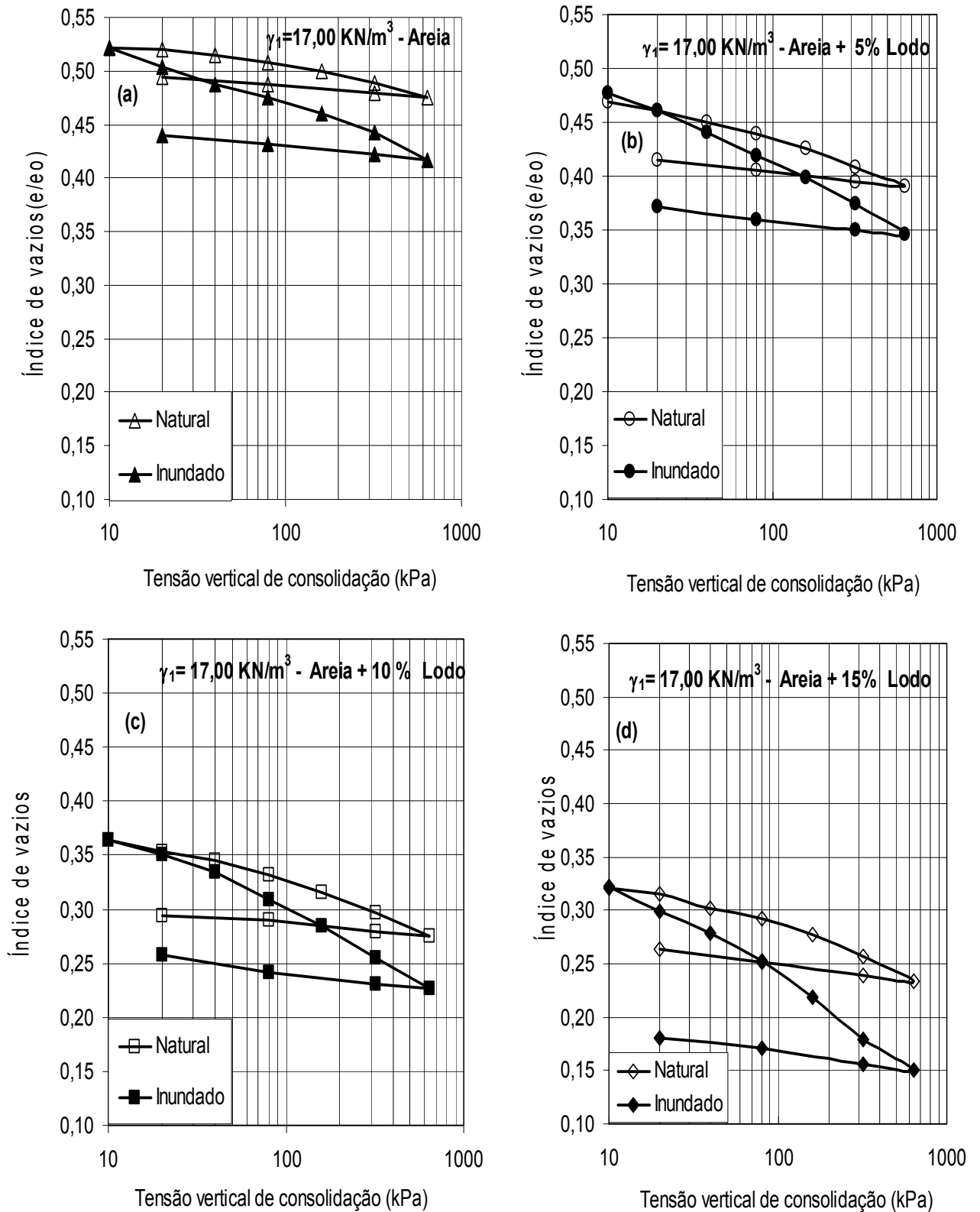


Figura 4.16– Índice de vazios x tensão vertical de consolidação em ensaios edométricos duplos para peso específico aparente seco de $17,00 \text{ kN/m}^3$: a) areia b) areia 5% de lodo, c) areia 10% de lodo, d) areia 15% de lodo.

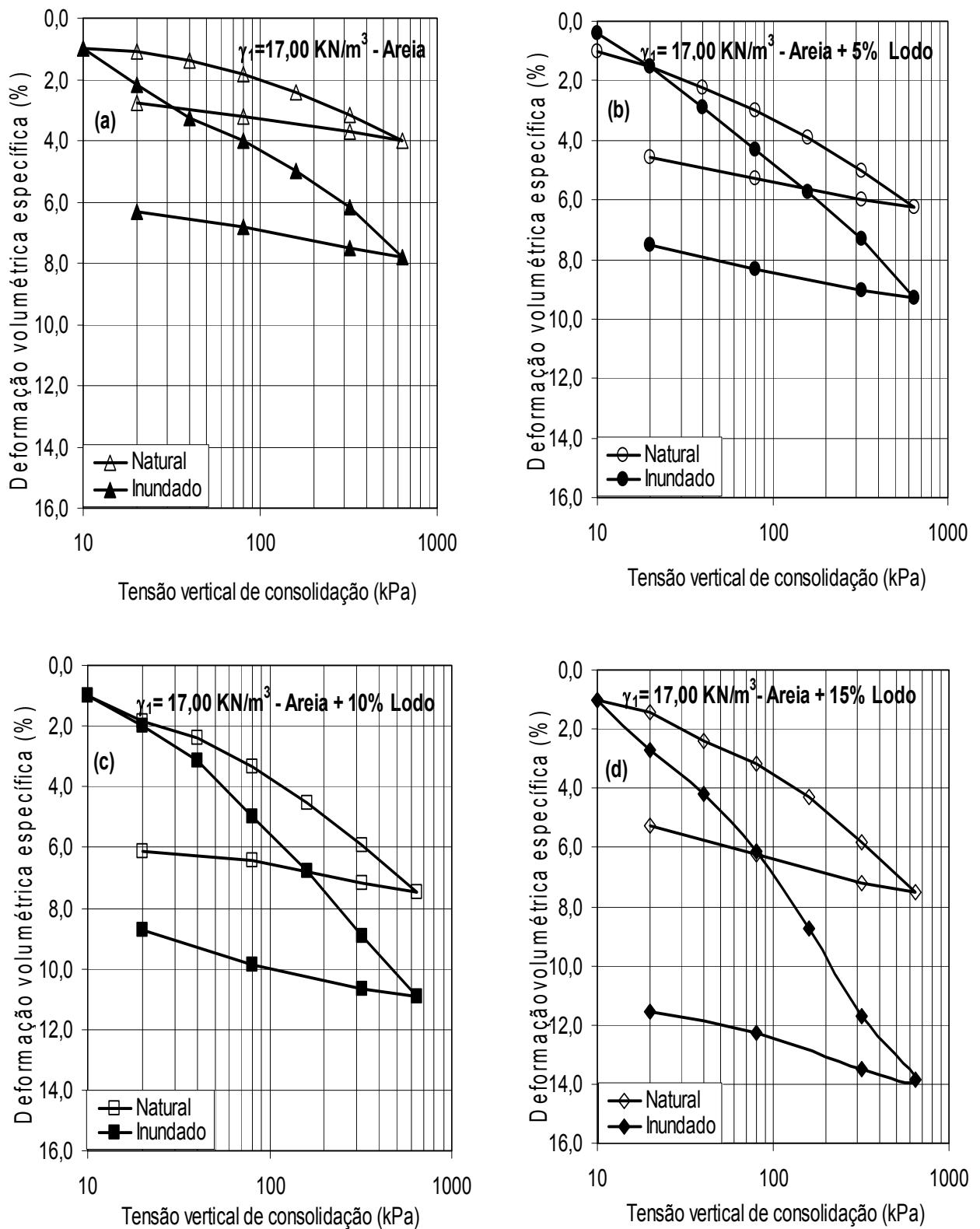


Figura 4.17 – Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação em ensaios edométricos duplos para peso específico aparente seco de $17,00 \text{ kN/m}^3$: a) areia b) areia 5% de lodo, c) areia 10% de lodo, d) areia 15% de lodo.

Tabela 4.8 – Coeficientes e Parâmetros dos ensaios Edométricos duplos com amostras de solo e misturas solo-lodo com peso específico seco de 15,00kN/m³.

Amostras	Tipo de ensaio	Coeficientes e Parâmetros			
		Índice de compressão (C _c)	Faixa de tensão (kPa)	Índice de expansão (C _s)	Tensão de Pré-consolidação (kPa)
Areia + 0 % Lodo	Natural	0,046	10-80	0,015	115,61
		0,055	160-640		
	Inundado	0,111	10-80	0,021	73,96
		0,129	160-640		
Areia + 5 % Lodo	Natural	0,044	10-80	0,016	150,31
		0,090	160-640		
	Inundado	0,111	10-80	0,021	125,89
		0,165	160-640		
Areia + 10 % Lodo	Natural	0,040	10-80	0,018	81,85
		0,078	160-640		
	Inundado	0,091	10-80	0,021	64,82
		0,165	160-640		
Areia + 15 % Lodo	Natural	0,038	10-80	0,015	80
		0,071	160-640		
	Inundado	0,096	10-80	0,021	40
		0,109	160-640		

Tabela 4.9– Coeficientes e Parâmetros dos ensaios Edométricos Duplos com amostras de solo e misturas solo-lodo com peso específico seco de 17,00kN/m³.

Amostras	Tipo de ensaio	Coeficientes e Parâmetros			
		Índice de compressão (C _c)	Faixa de tensão (kPa)	Índice de expansão (C _s)	Tensão de Pré-consolidação (kPa)
Areia + 0 % Lodo	Natural	0,023	10-80	0,014	147,23
		0,042	160-640		
	Inundado	0,049	10-80	0,017	231,06
		0,079	160-640		
Areia + 5 % Lodo	Natural	0,035	10-80	0,015	128,33
		0,057	160-640		
	Inundado	0,070	10-80	0,018	207,49
		0,089	160-640		
Areia + 10 % Lodo	Natural	0,039	10-80	0,016	118,23
		0,066	160-640		
	Inundado	0,052	10-80	0,018	54,50
		0,092	160-640		
Areia + 15 % Lodo	Natural	0,039	10-80	0,021	126,64
		0,069	160-640		
	Inundado	0,076	10-80	0,025	66,15
		0,110	160-640		

Para o peso específico aparente seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$ na condição natural o acréscimo de lodo ao solo na proporção de 5 % aumenta a tensão de Pré- consolidação em 30 % decrescendo posteriormente. Apresentando comportamento similar quando inundado, com um acréscimo da tensão de Pré- consolidação em 70 % para o acréscimo de 5 % de lodo, decrescendo com as proporções de 10 % e 15 % do lodo.

Pode-se observar também, que com o peso específico seco de $17,00 \text{ kN/m}^3$ os parâmetros obtidos a partir dos ensaios na umidade natural foram inferiores aos obtidos a partir dos ensaios inundados. Com o peso específico seco de $17,00 \text{ kN/m}^3$ a compressibilidade aumenta com o acréscimo do percentual de lodo tanto na condição natural quanto inundado. O acréscimo de lodo na condição natural diminui a tensão de Pré- consolidação em 13 % , 20% e 14 % nas proporções de 5 % , 10 % e 15 %, respectivamente, em relação a tensão de Pré- consolidação do solo natural. Na condição inundado reduziu as tensões Pré- consolidação em 10 %, 76 % e 71 % nas proporções de 5 %, 10 % e 15 %, respectivamente. Para manter o mesmo peso específico seco no solo o acréscimo do percentual de lodo causa uma redução do índice de vazios do solo justificando uma menor compressibilidade devido ao acréscimo do lodo.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÕES DO LODO COMO AGREGADO NO CONCRETO

5.1 Concreto com Agregado Convencional e Agregado de Solo-Lodo

5.1.1 Caracterização física do agregado miúdo e graúdo

As curvas granulométricas referentes ao agregado miúdo utilizado neste estudo e do lodo que substituirá parcialmente à areia e o agregado graúdo são apresentadas na Figura 5.1. O agregado miúdo apresenta módulo de finura 2,57 e massa específica de $2,65 \text{ g/cm}^3$ e o agregado graúdo com módulo de finura 7,38.

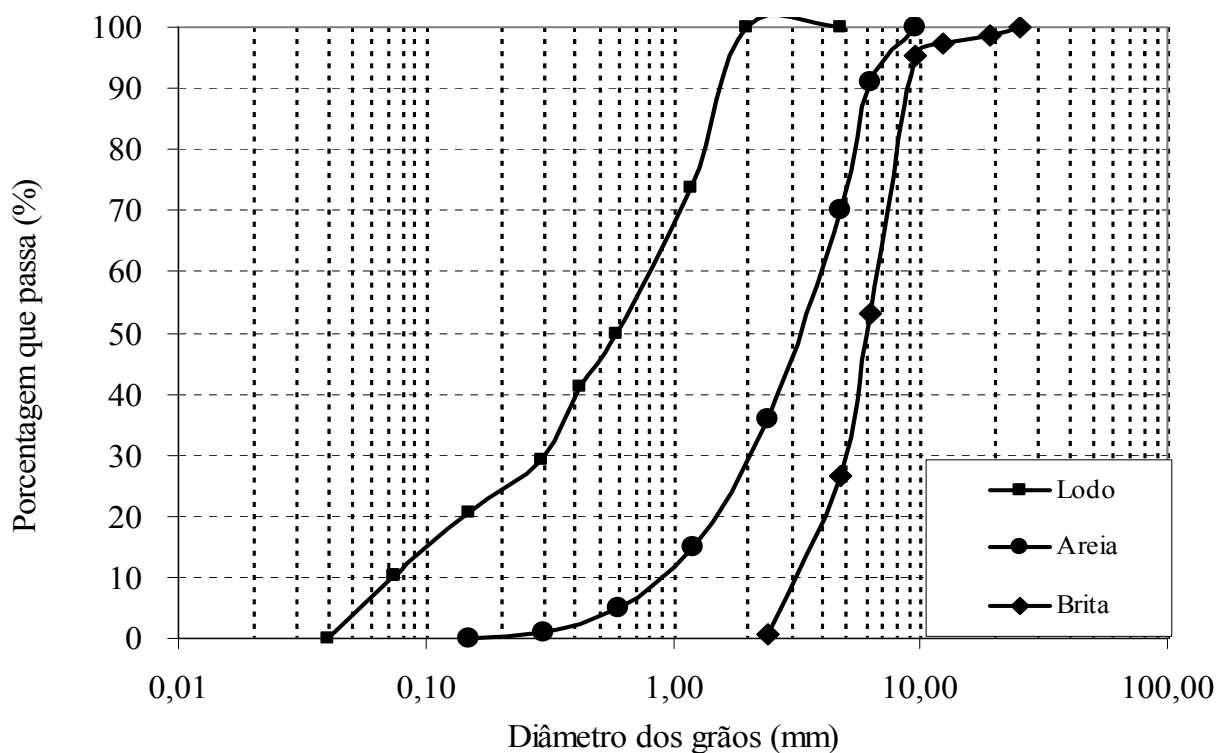


Figura 5.1 – Curvas granulométricas dos agregados

5.1.2 Características dos corpos-de-prova

As características dos corpos-de-prova com agregado convencional e com as misturas nas proporções de 5%, 10% e 15% de lodo são apresentadas nas Tabelas B.1 a B.8 para a relação $a/c = 0,57$ e $a/c = 0,65$ e Figuras B.1 a B.8 do apêndice B.

5.1.3 Velocidade Ultra-Sônica

Os valores das velocidades para os traços com relação $a/c = 0,57$ e $a/c=0,65$ são apresentados na Tabela 5.1. Os gráficos da velocidade ultra-sônica versus idade, obtidos nos ensaios, são mostrados na Figura 5.2. Estão incluídos também resultados de OLIVEIRA (2007) com RCD, para efeito de comparação.

Tabela 5.1– Valores da velocidade da onda ultra-sônica

Idade (dias)	Velocidade da onda ultra-sônica (Km/s)							
	Relação $a/c=0,57$				Relação $a/c=0,65$			
	0% lodo	5% lodo	10% lodo	15% lodo	0% lodo	5% lodo	10% lodo	15% lodo
7	4,51	4,22	3,92	3,54	4,53	4,06	3,84	3,73
14	4,62	4,20	4,04	3,80	4,64	4,08	3,94	3,90
28	4,68	4,54	4,26	3,90	4,77	4,07	4,01	3,94

Nota-se que os valores da velocidade ultra-sônica diminui com o aumento da percentagem de lodo. Entretanto estes valores são superiores aos valores obtidos por OLIVEIRA (2007).

Nota-se que os valores da velocidade ultra-sônica diminui com o aumento da percentagem de lodo. Entretanto estes valores são superiores aos valores obtidos por OLIVEIRA (2007).

O acréscimo de percentual de lodo ao concreto como agregado diminui a velocidade ultra-sônica embora seja maior que no concreto com uso de RCD. Os valores das velocidades ultra-sônica para os dois concreto ficaram dentro dos valores que caracterizam os concretos como de boa qualidade, conforme a Tabela 5.2 que mostra a classificação da qualidade do concreto segundo a velocidade ultra-sônica. (ISAIA, 2005, p.991 apud WHITEURST,1966).

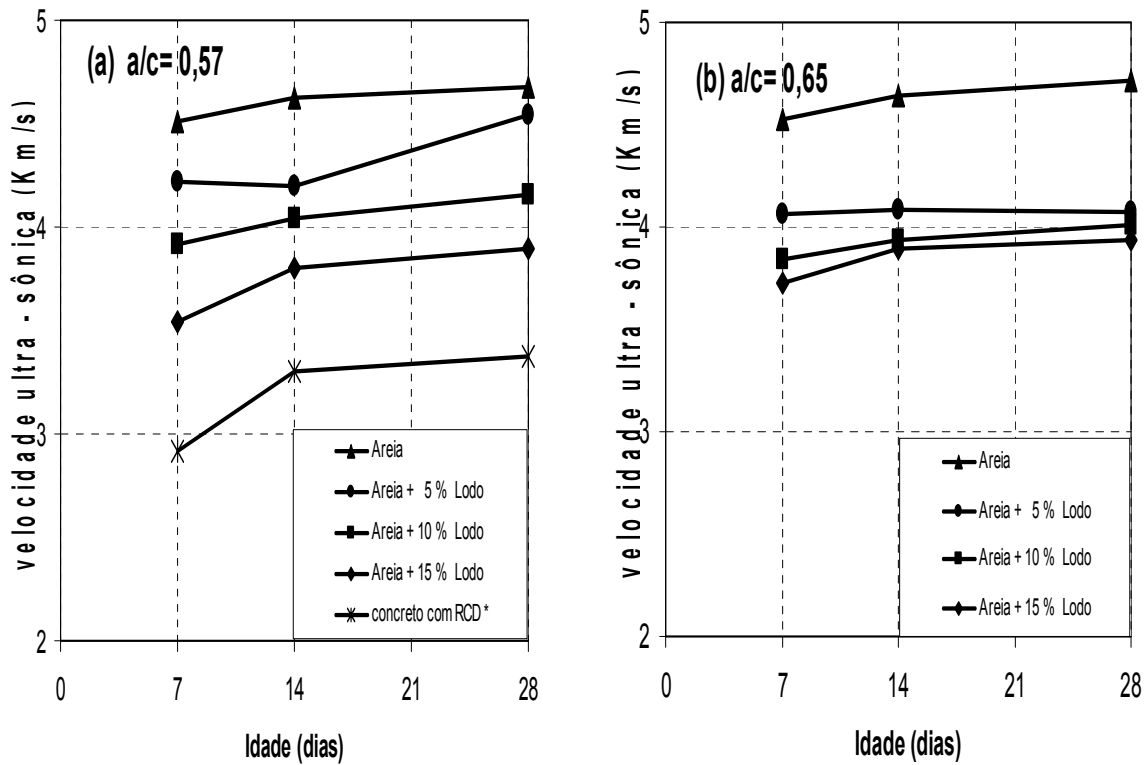


Figura 5.2 - Velocidade ultra -sônica x idade: (a) concreto convencional, com lodo de esgoto e com RCD* (OLIVEIRA, 2007), $a/c = 0,57$; (b) concreto convencional e com lodo de esgoto $a/c = 0,65$.

Tabela 5.2 - Classificação da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação da onda ultra-sônica

Velocidade da onda ultra - sônica (m/s)	Qualidade do Concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Bom
$3000 < V < 3500$	Regular (duvidoso)
$2000 < V < 3000$	Geralmente ruim
Inferior $< V < 2000$	Ruim

5.1.4 Índice Esclerométrico

Os valores das médias do índice esclerométrico são apresentados na Tabela 5.3. Os valores do índice esclerométrico versus idade, obtidos nos ensaios, são mostrados nas Figuras 5.2 com os resultados de Oliveira (2007) para comparação.

Tabela 5.3 – Valores dos índices esclerométricos

Idade (dias)	Índices Esclerométricos (média)							
	Relação a/c=0,57				Relação a/c=0,65			
	0% lodo	5% lodo	10% lodo	15% lodo	0% lodo	5% lodo	10% lodo	15% lodo
7	26,50	24,50	18,50	20,00	23,00	17,00	19,50	19,00
14	28,50	25,00	20,50	19,50	25,50	19,50	19,00	19,00
28	30,00	25,00	20,50	20,50	26,00	22,00	21,00	20,00

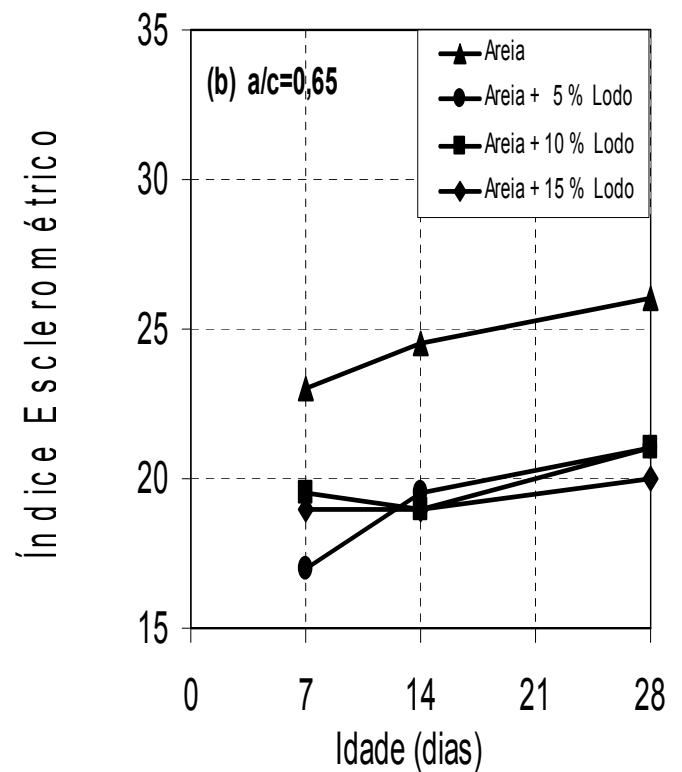
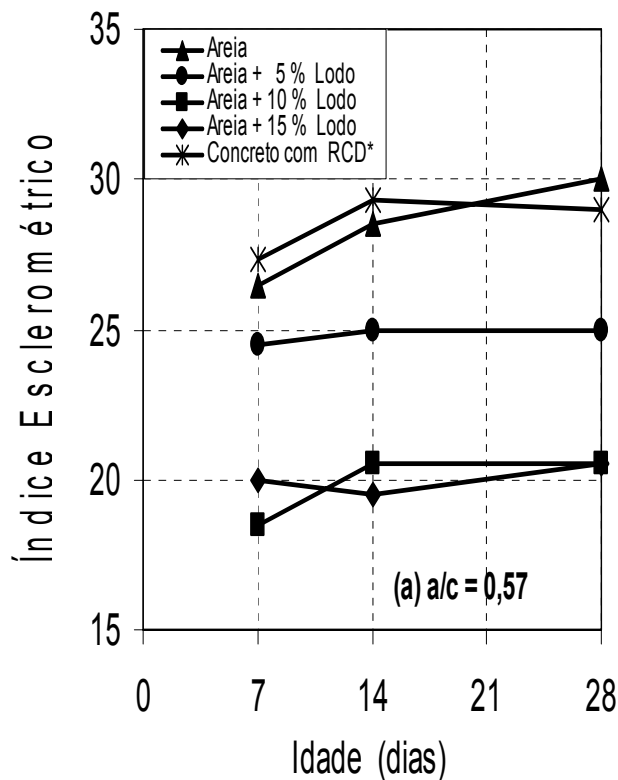


Figura 5.3 – Índice esclerométrico x idade: (a) concreto convencional, com lodo de esgoto e com RCD* (OLIVEIRA, 2007), a/c = 0,57; (b) concreto convencional e com lodo de esgoto a/c = 0,65.

Observamos que os índices esclerométricos diminuem com o acréscimo de percentual de lodo tanto para o fator a/c = 0,57 como para fator a/c = 0,65. Comparando com o concreto RCD* de Oliveira (2007), verifica-se que este apresenta valores maiores. O acréscimo de percentual de lodo ao concreto como agregado diminui o índice esclerométrico para uma mesma data de cura. O fator água/ cimento não foi sensível a mistura solo-lodo.

5.1.5 Resistência à Compressão

Os valores das resistências são apresentados na Tabela 5.4. Os gráficos da resistência à compressão versus idade, obtidos nos ensaios, são mostrados nas Figuras 5.4 e, também os resultados referentes ao RCD* (OLIVEIRA, 2007).

Tabela 5.4– Valores das resistências à compressão

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)							
	Relação a/c=0,57				Relação a/c=0,65			
	0% lodo	5% lodo	10% lodo	15% lodo	0% lodo	5% lodo	10% lodo	15% lodo
7	20,04	16,08	12,20	11,50	19,30	14,64	11,75	10,76
14	25,86	19,99	14,50	13,60	21,50	16,18	12,60	11,69
28	27,84	22,83	16,36	17,60	23,06	14,95	12,69	12,80

O acréscimo de percentual de lodo ao concreto como agregado diminui a resistência a compressão e apresenta valores próximos aos obtidos em concreto com agregado de RCD*, Figura 5.4 a.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994) a resistência mais utilizada nas estruturas é a moderada, na qual a resistência à compressão varia entre 20 e 40 MPa. Helene e Terziani (1995) confirmam que a resistência para garantir a viabilidade do concreto deve ser superior a 20 MPa, limite atingido aos 28 dias para a proporção de 5 % (a/c = 0,57). As resistências nas proporções de 10 a 15 % resultaram abaixo deste valor. Para a/c = 0,65, a resistência não atingiu este limite.

Com relação a resistência à compressão observamos que decresce com o aumento de percentual de lodo até 10% e posteriormente aumenta para a a/c=0,57 sendo um pouco maior, comparada aos resultados do RCD* (OLIVEIRA, 2007). Para a a/c=0,65, com aumento do percentual de lodo a resistência decresce, e com relação ao RCD* (OLIVEIRA, 2007) é menor.

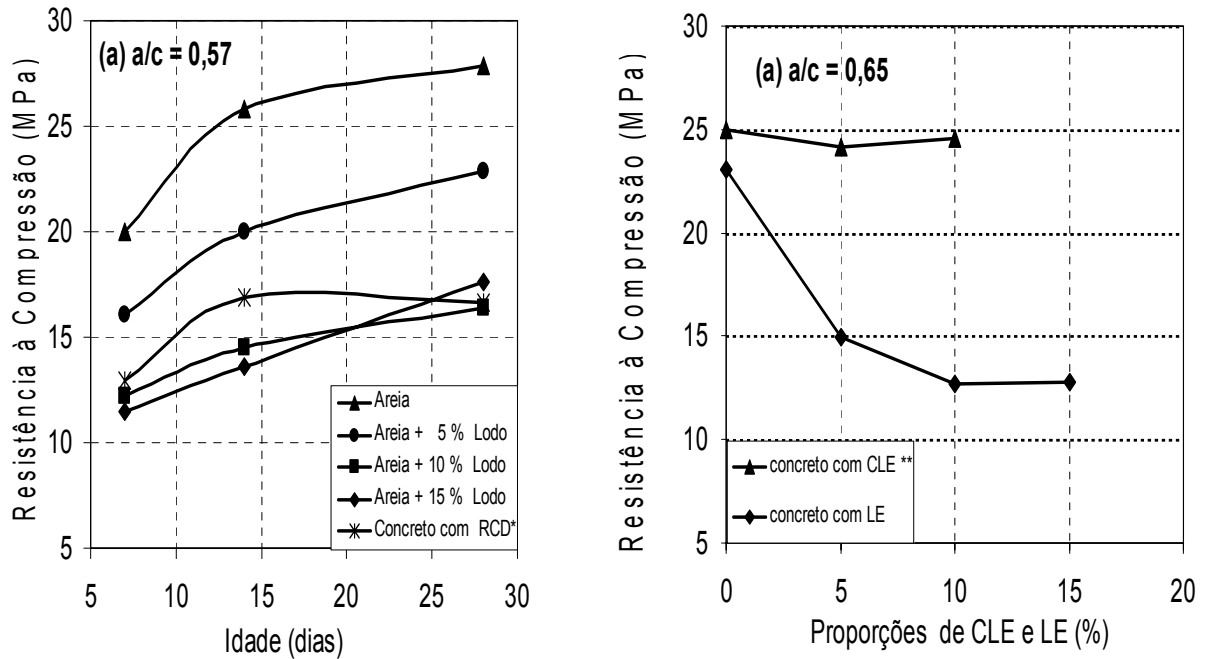


Figura 5.4 – Resistência à compressão versus idade: (a) concreto convencional, com lodo de esgoto e com RCD* (OLIVEIRA, 2007), $a/c=0,57$; (b) concreto convencional, com lodo de esgoto e com CLE** (FONTES, 2003), $a/c=0,65$.

5.1.6 Absorção por Capilaridade

Os resultados dos valores de absorção de água por capilaridade após 72h e da absorção por capilaridade considerando um tempo de 3 até 72 horas, conforme norma, são apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6 e os resultados de absorção por capilaridade versus tempo, ilustra na Figura 5.5.

Nota-se que ocorre uma redução nos valores obtidos com aumento de percentual de lodo em torno de 63 % para o fator $a/c = 0,57$ e para o fator $a/c = 0,65$ em torno de 52 %. Os valores encontrados para os concretos nas proporções de 5 %, 10 % e 15 %, são da mesma ordem de grandeza. O acréscimo de percentual de lodo ao concreto como agregado diminui a absorção independente do percentual de lodo adicionado.

Segundo Neville (1997), a absorção não é considerada uma medida de qualidade de concreto, no entanto, observa-se que os concretos de boa qualidade apresentam absorção abaixo de 10%. Neste caso, a absorção ficou abaixo de 3 %, podendo ser enquadrado como um concreto de boa qualidade.

Tabela 5.5 - Resultado dos ensaios de absorção capilar após 72 horas

Amostras	Massa Inicial (g)	Massa após 72 h (g)	Total absorvido (g)	% absorvido
Relação a/c = 0,57				
Areia + 0 % lodo	3510,1	3610,6	100,5	2,78
Areia + 5 % lodo	3248,9	3319,6	70,7	2,12
Areia + 10 % lodo	3277,8	3340,3	62,5	1,87
Areia + 15 % lodo	3028,1	3102,8	74,7	2,41
Relação a/c = 0,65				
Areia + 0 % lodo	3397,1	3469,5	72,4	2,09
Areia + 5 % lodo	3089,0	3135,0	46	1,33
Areia + 10 % lodo	3027,9	3076,2	48,3	1,57
Areia + 15 % lodo	3035,4	3081,2	45,8	1,49

Tabela 5.6 – Valores da absorção por capilaridade

Tempo (horas)	Absorção por capilaridade (kPa)							
	Relação a/c=0,57				Relação a/c=0,65			
	0% lodo	5% lodo	10% lodo	15% lodo	0% lodo	5% lodo	10% lodo	15% lodo
3	0,57	0,36	0,34	0,39	0,36	0,18	0,19	0,17
6	0,66	0,41	0,39	0,43	0,47	0,23	0,24	0,22
24	1,10	0,61	0,62	0,67	0,77	0,41	0,42	0,41
48	1,35	0,74	0,77	0,83	0,92	0,52	0,53	0,52
72	1,45	0,82	0,86	0,91	0,98	0,59	0,58	0,51

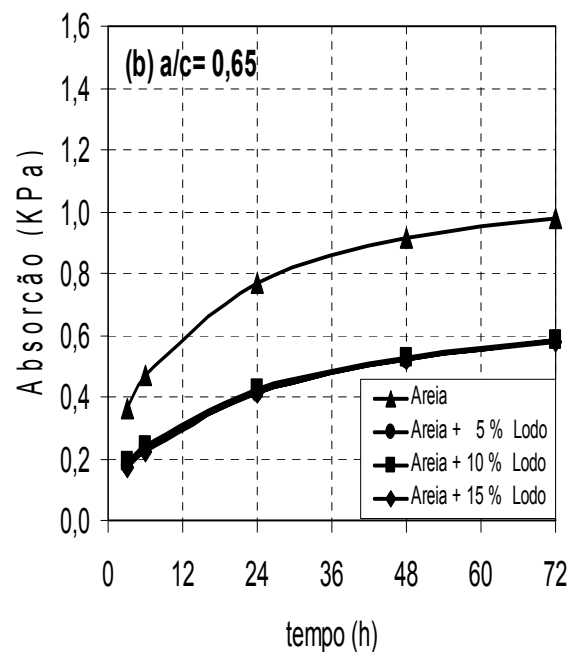
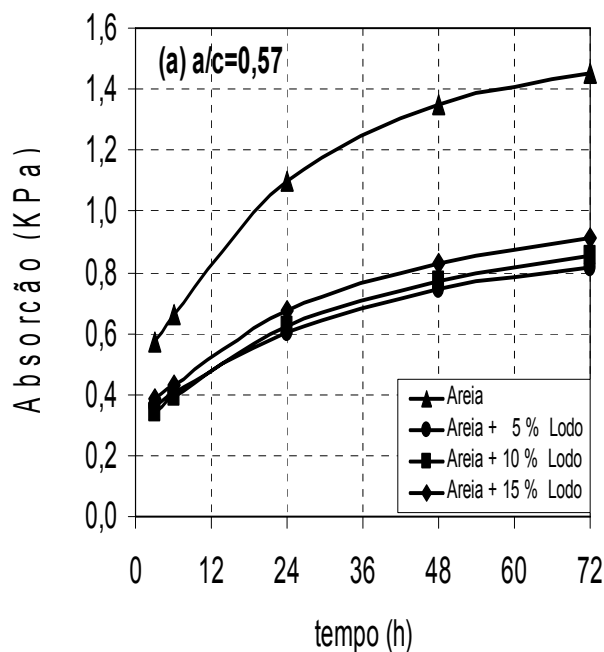


Figura 5.5 – Absorção por capilaridade versus tempo, com concreto convencional, com lodo de esgoto: (a) para fator a/c = 0,57; (b) para fator a/c = 0,65.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

As conclusões apresentadas não devem ser tomadas de forma absoluta, pois se referem a tão somente aos dados a serem obtidos na análise dos lodos gerados nas ETEs de Mangueira e Curado, PE, e que se constitui em dados e informações na execução de novas pesquisas que apresentem resultados que possam complementar e/ou confirmar os dados obtidos neste estudo.

- Os lodos não podem ser considerados com um resíduo único, pois eles constituem uma família de lodos diferentes de ETE para ETE, e conseqüentemente cada ETE deve ser tratada como única, em um processo de reuso ou reciclagem;
- Há alterações físicas, químicas e micro estruturais no solo com a adição de lodo de esgoto ao solo natural.
- A condutividade hidráulica do solo diminui com o acréscimo de lodo, atingindo 60 % quando é adicionado a dose equivalente a 75 Mg ha^{-1} de lodo ao solo natural, equivalente a um acréscimo na tensão confinante de 50 kPa ao solo.
- Para manter o mesmo peso específico aparente seco da mistura solo – lodo, o acréscimo do percentual de lodo proporciona uma redução do índice de vazios do solo justificando uma menor compressibilidade devido ao acréscimo do lodo. Mostrando ser adequado para melhoramento de solos colapsíveis.
- A resistência à compressão do concreto diminui com o aumento de teor de lodo, sendo o efeito mais expressivo para a adição de 10 % do lodo, quando comparado com o concreto referência de 25 Mpa.

- Os concretos com adição acima de 5% de lodo restringem a sua aplicação, principalmente por não apresentarem propriedades mecânicas para a sua utilização, sendo esta inferior a 15 MPa.
- Constatou-se que a adição do lodo de ETE em concreto pode ser uma alternativa viável e ambientalmente correta, uma vez que promove a redução de quantidades consideráveis deste material a ser dispostos em aterros ou devolvidos a cursos d'água, bem como reduções significativas no consumo de agregados naturais. Podendo ser utilizado em obras de pequeno porte.

6.1 Sugestões para futuras pesquisas

- Estudos detalhados das características físicas, químicas e mineralógicas do lodo das ETEs e estudo;
- Prosseguimento da pesquisa no sentido de estudar a utilização do lodo de forma concreta, ou seja: no fabrico pisos, muros, calçadas e outros;
- Recomenda-se que sejam feitos outros testes para verificação do concreto nas demais propriedades, entre eles: resistência à tração por flexão e compressão diametral, módulo de deformação estática e lixiviação.
- Que os resultados obtidos na pesquisa, no que se refere ao aspecto ambiental, isto é, quanto a capacidade em reter de forma segura os compostos nocivos presentes no lodo devam ser analisados, através de ensaios de solubilização, lixiviação, difração de Raios-X, e outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA: **Standard methods for examination of water and wastewater**, 18. ed. Washington: Victor Grapics, 1992

ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I. de; FERNANDES, F. **Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções**. Curitiba: SANEPAR; FINEP, 1999.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA/UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001a.

ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Curitiba: FCO, 2001b. v. 6.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2001c. v. 6, p. 319-397.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 10004: resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 1207: ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

_____. **NBR 5739: concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 6459: solo - determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984b.

_____. **NBR 6508: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984a.

_____. **NBR 7180: Solo - determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984c.

_____. **NBR 7182: ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984 d.

_____. **NBR 7211**: agregado para concreto: Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

_____. **NBR 7215**: cimento portland – determinação de resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

_____. **NBR 7222**: argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1994a.

_____. **NBR 8802**: concreto endurecido de propagação de onda ultra – sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

_____. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

_____. **NBR NM 78**: concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

_____. **NBR 6467**: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

AZEVEDO NETTO, J. M. Cronologia do abastecimento de água (até 1970). **Revista DAE**, [S.l.]: v. 44, n. 137, p. 106-111, jun. 1984.

AZEVEDO NETTO, J. M.de. Sistemas de esgotos sanitários. Generalidades, aspectos sanitários, sistema unitário, sistema separador, partes constitutivas de um sistema de esgotos sanitários. In: _____. **Sistemas de esgotos sanitários**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1977. p. 1-14.

BARBOZA, R. S. L. **Influência do lodo de esgoto na nodulação e no desenvolvimento do Caupi**. 2007. 84 f. Dissertação (Mestrado em desenvolvimento de Processos Ambientais). Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2007.

BETTIOL, W. ; FERNANDES, S. A. P. **Efeito do lodo de esgoto na comunidade microbiana e atributos químicos do solo**. Jaguariúna: EMBRAPA. [199-]. Comunicado Técnico, n. 24. 6 f. São Paulo.

BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soils**. New York: R. E. Krieger, 1976.

BROSCH, C. D. Fabricação de agregado leve a partir de lodo de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 8., 1975, Rio de Janeiro. **Anais...** . São Paulo: CETESB, 1975. p. 103-107.

BROSCH, C. D.; ALVARINHO, S. B.; SOUZA, H. R. **Fabricação de agregado leve a partir de lodo de esgoto de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1976.

CAMARGO, O. A. de; BETTIOL, W. Agricultura: opção animadora para utilização do lodo. **O agrônomo**, Campinas, v. 52, n. 2/3, 2000.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO. Departamento de Gerenciamento Metropolitano. Croqui ETE Mangueira. Recife 2009.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2009.

DUARTE, A. de C. L. **Incorporação de lodo de esgoto na massa cerâmica para fabricação de tijolos maciços**; uma alternativa para a disposição final de resíduo. 2008. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária. Natal, 2008.

DURANTE-INGUZA, M. P.; ANDREOLI, C. V.; NASCIMENTO, R. M. TINOCO, J. D., HOPPEN, C.; PERGORINI, E.S. Uso de resíduos do Saneamento na fabricação de cerâmica vermelha. 283-359. In: ANDREOLI, C.V (Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro. Centro Nacional de Pesquisas de solos, 1997.

FAUSTINO, R. Compostagem e solarização para higienização de lodo de esgoto e uso no cultivo de Cassia Amarela (Senna Siamea Lam). Recife, 2007. Tese (Doutorado). Centro de Ciências e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). 2007.

FERNANDES, F. **Uso e manejo do lodo de esgotos na agricultura**, Curitiba: SANEPAR, 1999.

FERREIRA, R. C. **Uso do lodo de esgoto no desenvolvimento do Açaí**. 2008. 59 f. Dissertação (Mestrado em desenvolvimento de Processos Ambientais). Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2008.

FERREIRA, S. R. M.; OLIVEIRA, J. T. R.; MESSIAS, A. S.; SILVA, H. A. e. ; FEITOSA, M. C. A. Interação solo-lodo de esgoto: física, química, microestrutural e condutividade hidráulica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 14, 2008. Búzios. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2008. v. 2. p. 168.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à inundação**. Rio de Janeiro: 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1995.

FONTES, C.M. A., **Potencialidades de cinzas de lodo de estações de tratamento de esgotos como material suplementar para produção de concretos com cimento Portland**. 2003.120 f. Tese (Dissertação em Ciências da Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE. Rio de Janeiro, 2003.

FUTAI, M. M. **Análise de ensaios edométricos com sucção controlada em solos colapsíveis**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.

GEORGE, M. S. Concrete aggregate from wastewater sludge. **Concrete international design & construction**, [S. l.]. v. 8, n.11, p. 27-30, nov. 1986.

GEYER, A. L. **Contribuição ao estudo de disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

GUIMARÃES NETO, J. S. F. **Análise de alguns fatores que influenciam a colapsibilidade de um solo compactado devido à inundação**. 1997. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1997.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1993.

HEREK, L. C. V. S.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R.G.; UEMURA, V. D.; PANCOTTE, L.P. Estudo da solidificação/estabilização do lodo da indústria têxtil em material cerâmico. **Cerâmica industrial**, [S. l.]. v. 10, n. 4, p. 4-46, 2005.

ISAIA, G. C.(Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

JENNINGS, J. E. B.; KNIGHT, K. The additional settlement of foundations due to collapse of structure of sandy subsoil on wetting. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4., London, 1957. **Proceedings....** London: [S. l.]. v. 1, p. 316-319.

JONH, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição metodológica de pesquisa e desenvolvimento. 2000.113 f. Tese (Livre- Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

JONH, V. M.; ÂNGULO, S. C. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. In: JONH. M; ROCHA, J. C. (Org). **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre: [S. l.]. 2003. v.1, p.8-7.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A., Tratamento de esgotos domésticos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABES 1995.

LESSA, G. T. **Contribuição ao estudo da viabilidade da utilização do lodo de estação biológica de esgoto isto da construção civil**. 2005. 135 f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

LÓGICA ENGENHARIA. Diretoria Administrativa. Planta ETE Curado. Recife 2009.

LOPES, M.A. J. de. **Incorporação de lodo de esgoto e seus efeitos sobre alguns atributos do solo cultivado com rabanetes**. 2008. 99f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais) Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2008.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para plantas. In: BETTIOL, W. CAMARGO, O. A., Eds. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p 109-141.

METCALF, L.; EDDY, H.P. **Tratamiento y depuración de las aguas residuales**. Barcelona: Labor, 1977.

METHA, P. R.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: [s. n.]. 1994.

MORALES, G.; AGOPYAN, V. **Caracterização do agregado leve a partir de lodo da cidade de Londrina**. São Paulo: EPUSP, 1992. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/64.

MORALES, G. **Verificação e avaliação da reatividade pozolânica da cinza de lodo de esgoto da cidade de Londrina**. 1994. 70 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

MOTTA, E. Q. **Análise do colapso de um solo compactado devido à inundação e à interação solo-líquido contaminante**. 2006. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2006.

NEVILLE, A, M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997.

OLIVEIRA, P. E. S., OLIVEIRA, J. T. R., FERREIRA, S. R. M. **Avaliação da resistência à compressão do concreto com uso de agregado de resíduos de construção e demolição – RCD**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007. Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON. 2007. p. 14 f.

ONAKA, T. Sewage can make Portland cement: a new technology for unimate reuse of sewage sludge. **Water science & technology**, [S.l.]. v. 41, n .8, p. 93-98, 2000.

PAIVA, S. C. de, **Estudo químico do saibro coletado na região metropolitana do Recife para utilização em argamassas de assentamento e revestimento em alvenaria**. 2008.150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2008.

PERA, A.F. Classificação. Composição. Efluentes domésticos. In: **Sistemas de esgotos sanitários**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1977. p. 15-28.

PERGORINI, E. S.; ANDREOLI, C. V. ; SOUZA, M. L. de P. FERREIRA, A. Qualidade do lodo de esgoto utilizado na reciclagem agrícola na região metropolitana de Curitiba - SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE BIODSÓLIDOS. 1., [S. l.], 2003. **Anais....** São Paulo, jun. 2003.

REGINATO, A . R. ; FERRERO, J. C. Collapse potential of soil and soil-water chemistry. proceedings, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 7., [S. l. : s. n.], 1973. Moscow, **Proceedings...**v. 2, p. 177-183.

SANTOS, A. D. **Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da região Metropolitana de São Paulo**. 2003. 265f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SANTOS, H. F. Light aggregate and organo - mineral fertilizer from digested sewage sludges. A general view on other beneficial uses for sewage treatment plants by – products. In: ITALIAN – BRASIIAN SYMPOSIUM ON SANITARY AND ENVIROMENTAL ENGINEERING, 1., São Paulo, 1992. 17 f.

_____. Tecnologias de uso útil do lodo dos esgotos. In: ENCONTRO TÉCNICO ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS DA SABESP, 12, 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s. n.] , 2001. 1 CD-ROM.

SILVA, A. B. **Planejamento experimental e modelagem estatística do efeito do uso de lodo em solos**. 2008. 54. f. Dissertação (Mestrado em desenvolvimento de Processos Ambientais). Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2008.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A. e BERNARDES, E. M.. Efeito do lodo de esgoto na fertilidade de um argilossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana de açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília - DF, v. 36, n. 5, p. 831-840, maio, 2001.

SILVA, H. A. e. Avaliação da mobilidade do cádmio em solo tratado com lodo de esgoto. 2007.30f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007.

SLIM, J. A.; WAKEFIELD, R. W. The utilization of sewage sludge in the manufacture of clay bricks. **Water SA**. v. 17, n. 13, p. 197-202. jul. 1991.

SOUZA NETO, J.B. Características geotécnicas do solo residual de gnaiss da encosta Espinhaço da Gata, 1998, 249 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), UFPE. Recife. 1998.

SOUZA NETO, J. B. **Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo e previsão de recalques devidos à inundação (Colapso)**. 2004. 432 f. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2004.

TAY, J. H. Properties of pulverized sludge as blended cement. **ACI materials journal**, v. 84, n. 5, p. 358-64, 1987.

TAY, J. H. Sludge Ash Filler for Portland Cement Concret. *Journal of Environmental Engineering*, [S. l.]. v.113, n. 2 , p. 345-351, 1987b.

TAY, J. H.: SHOW, K.Y. Resource recovery of sludge as a building and construction material: a future trend in sludge management. **Water science & technology**, [S. l.]. v. 36, n. 11, p. 259-66, 1997.

_____. Properties of cement made from sludge. **Journal of environmental engineering**, [S. l.]. v.117, n. 2, p. 236-246, 1991.

TOMÉ Júnior, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2001, 247 p.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodo de estação de água do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais ... ABES**, 2001. 1 CD-ROM.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte, DESA/UFMG, 1996a.

WERTHER, J.; OGADA, T. Sewage sludge combustion. **Progress in energy and combustion science**, [S. l.]. n. 25, p. 55-116, 1999.

APÊNDICE A

**ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS E FINAIS NO SOLO E SOLO-LODO
EDOMÉTRICOS SIMPLES E DUPLOS**

Nas Tabelas A.1 a A.4 são apresentados os índices físicos iniciais e finais e Potenciais de Colapso no solo e misturas solo nas proporções de 5 %, 10 % e 15 % com o peso específico aparente seco de 15 kN/m³.

Tabela A.1 - Ensaios Edométricos Simples – 15,00 kN/m³ - Índices Físicos iniciais e finais e Potenciais de Colapso no solo e solo-lodo .

Areia + 0 % lodo	ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS				ÍNDICES FÍSICOS FINAIS				POTENCIAL DE COLAPSO CP (%)
Tensão de Inundação (kPa)	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	
10	15,05	4,99	17,63	0,741	15,20	25,84	93,76	0,722	0,11
20	15,05	4,99	17,65	0,741	15,30	24,60	90,91	0,709	0,51
40	15,06	4,81	17,04	0,740	15,60	24,84	95,24	0,683	1,30
80	15,05	4,96	17,53	0,741	16,00	24,13	98,84	0,640	3,75
160	15,05	4,96	17,55	0,741	16,40	22,94	99,93	0,601	4,99
320	15,05	5,02	17,75	0,741	16,90	20,92	99,94	0,548	6,61
640	15,05	5,02	17,76	0,741	17,00	20,80	99,98	0,545	5,81

γ_d - peso específico aparente seco ; W – umidade; Sr - Grau de saturação; e - índice de vazios.

Tabela A.2 - Ensaios Edométricos Simples – 15,00 kN/m³ - Índices Físicos iniciais e finais e Potenciais de Colapso no solo e solo-lodo 5 %.

Areia + 5 % lodo	ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS				ÍNDICES FÍSICOS FINAIS				POTENCIAL DE COLAPSO CP (%)
Tensão de Inundação (kPa)	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	
10	15,09	5,06	20,57	0,590	15,30	23,83	99,91	0,572	0,13
20	15,09	5,06	20,58	0,590	15,40	23,21	99,94	0,557	0,16
40	15,10	4,92	20,03	0,590	15,50	22,67	99,99	0,544	0,40
80	15,09	4,92	19,99	0,591	15,80	21,62	99,97	0,519	1,30
160	15,10	5,03	20,47	0,590	16,10	20,34	99,03	0,493	2,15
320	15,08	4,70	19,08	0,591	16,60	18,53	99,98	0,445	4,50
640	15,09	4,70	19,09	0,591	17,20	16,23	99,49	0,392	5,45

Tabela A.3 - Ensaios Edométricos Simples – 15,00 kN/m³ - Índices Físicos iniciais e finais e Potenciais de Colapso no solo e solo-lodo 10% .

Areia + 10 % lodo	ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS				ÍNDICES FÍSICOS FINAIS				POTENCIAL DE COLAPSO CP (%)
Tensão de Inundação (kPa)	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	
10	15,04	5,00	20,88	0,563	15,10	23,52	99,65	0,555	-0,49
20	15,04	5,00	20,88	0,563	15,30	22,89	99,90	0,538	- 0,06
40	15,04	5,08	21,23	0,562	15,40	22,02	99,15	0,522	0,52
80	15,03	5,08	21,19	0,563	15,70	21,28	99,97	0,500	1,03
160	15,04	5,08	21,22	0,563	15,90	20,38	99,96	0,479	1,30
320	15,03	5,10	21,28	0,563	16,30	18,62	99,49	0,440	1,96
640	15,03	5,10	21,28	0,563	16,50	18,98	95,81	0,424	2,81

Tabela A.4 - Ensaio Edométrico Simples – 15,00 kN/m³ - Índices Físicos iniciais e finais e Potenciais de Colapso no solo e solo-lodo 15 %.

Areia + 15 % lodo	ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS				ÍNDICES FÍSICOS FINAIS				POTENCIAL DE COLAPSO CP (%)
Tensão de Inundação (kPa)	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	
10	15,05	4,86	21,51	0,515	15,10	22,44	99,55	0,514	-0,92
20	15,05	4,86	21,50	0,515	15,30	21,62	99,94	0,493	-0,04
40	15,05	4,92	21,79	0,515	15,40	21,01	99,94	0,479	0,05
80	15,05	4,92	21,80	0,515	15,70	19,75	99,95	0,451	0,29
160	15,05	4,80	21,27	0,515	16,00	18,55	99,95	0,423	0,80
320	15,05	5,00	22,12	0,515	16,40	17,04	99,94	0,389	1,67
640	15,05	5,00	22,13	0,515	16,80	17,02	99,93	0,353	2,53

Os índices físicos iniciais e finais e Potenciais de Colapso no solo e misturas solo nas proporções de 5 %, 10 % e 15 % com o peso específico aparente seco de 17 kN/m³, são mostrados nas Tabelas A.5 a A.8.

Tabela A.5 - Ensaio Edométrico Simples – 17,00 kN/m³ - Índices Físicos iniciais e finais e Potenciais de Colapso no solo e solo-lodo .

Areia + 0 % lodo	ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS				ÍNDICES FÍSICOS FINAIS				POTENCIAL DE COLAPSO CP (%)
Tensão de Inundação (kPa)	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	
10	17,09	4,73	23,25	0,533	17,30	16,69	84,73	0,516	0,11
20	17,09	4,81	23,63	0,533	17,30	19,39	99,97	0,508	0,41
40	17,10	4,81	23,67	0,533	17,50	19,04	99,92	0,499	0,45
80	17,09	4,80	23,60	0,533	17,60	18,54	99,98	0,486	0,61
160	17,09	4,80	23,58	0,533	17,60	18,55	99,96	0,486	0,63
320	17,10	4,78	23,52	0,533	17,90	17,60	99,90	0,462	0,88
640	17,09	4,78	23,48	0,533	18,30	16,54	99,94	0,434	1,64

Tabela A.6- Ensaio Edométrico Simples – 17,00 kN/m³ - Índices Físicos iniciais e finais e Potenciais de Colapso no solo e solo-lodo 5 % .

Areia + 5 % lodo	ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS				ÍNDICES FÍSICOS FINAIS				POTENCIAL DE COLAPSO CP (%)
Tensão de Inundação (kPa)	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	
10	17,08	5,09	30,15	0,405	17,20	16,35	99,93	0,393	-0,11
20	17,08	5,09	30,18	0,405	17,40	15,83	99,93	0,380	-0,05
40	17,08	5,13	30,37	0,405	17,40	15,65	99,92	0,376	0,32
80	17,08	5,07	30,03	0,405	17,70	14,91	99,97	0,358	0,49
160	17,08	5,02	29,74	0,405	17,90	14,19	99,99	0,341	0,63
320	17,09	5,02	29,77	0,405	18,00	13,97	99,98	0,335	0,53
640	17,08	4,88	28,91	0,405	18,30	13,03	99,93	0,313	0,41

Tabela A.7- Ensaios Edométricos Simples – 17,00 kN/m³ - Índices Físicos iniciais e finais e Potenciais de Colapso no solo e solo-lodo 10 %.

Tensão de Inundação (kPa)	ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS				ÍNDICES FÍSICOS FINAIS				POTENCIAL DE COLAPSO CP (%)
	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	
10	17,05	5,08	31,59	0,378	17,20	15,70	99,93	0,369	-0,37
20	17,05	4,91	30,51	0,378	17,30	15,27	99,96	0,359	-0,29
40	17,05	5,00	31,08	0,378	17,50	14,74	99,95	0,347	0,02
80	17,05	5,09	31,64	0,378	17,70	13,94	99,99	0,328	0,76
160	17,05	5,08	31,57	0,378	18,10	12,68	99,88	0,298	0,78
320	17,06	5,09	31,68	0,378	18,10	12,59	99,89	0,296	0,79
640	17,05	5,09	31,62	0,378	18,80	10,72	99,86	0,252	1,08

Tabela A.8 - Ensaios Edométricos Simples – 17,00 kN/m³ - Índices Físicos iniciais e finais e Potenciais de Colapso no solo e solo-lodo 15%.

Tensão de Inundação (kPa)	ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS				ÍNDICES FÍSICOS FINAIS				POTENCIAL DE COLAPSO CP (%)
	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	γ_d (kN/m ³)	W (%)	Sr (%)	e	
10	17,05	5,11	34,55	0,337	17,00	14,85	99,83	0,339	-1,12
20	17,06	5,01	33,92	0,337	17,20	14,25	99,91	0,325	-0,60
40	17,06	5,01	33,91	0,337	17,60	13,09	99,93	0,299	-0,31
80	17,06	5,06	34,28	0,337	17,90	12,01	99,91	0,274	0,65
160	17,05	5,11	34,55	0,337	18,20	11,17	99,99	0,255	1,26
320	17,05	5,02	33,98	0,337	18,40	10,38	99,91	0,237	1,61
640	17,00	5,02	32,84	0,337	18,60	9,63	99,97	0,218	2,21

Nas Tabelas A.9 e A.10 são apresentados os índices físicos iniciais e finais no solo e misturas solo nas proporções de 5 %, 10 % e 15 % com o peso específico aparente seco de 15 kN/m³ e 17 kN/m³.

Tabela A.9- Índices físicos iniciais e finais dos corpos de prova dos ensaios Edométricos Duplos com amostras de solo e misturas solo-lodo compactadas com 15,00 kN/m³.

Peso Específico / % de Lodo		ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS				ÍNDICES FÍSICOS FINAIS			
		γ_d kN/m ³	W (%)	Sr (%)	e	γ_d kN/m ³	W (%)	Sr (%)	e
15,00 kN/m ³ / 0 % de Lodo	Natural	15,07	4,98	17,67	0,738	16,00	4,92	20,06	0,643
	Inundado	15,08	4,98	17,68	0,738	17,10	-	-	0,530
15,00 kN/m ³ / 05 % de Lodo	Natural	15,09	4,86	19,76	0,590	16,10	4,84	23,52	0,494
	Inundado	15,09	4,86	19,76	0,590	17,30	16,24	99,94	0,390
15,00 kN/m ³ / 10 % de Lodo	Natural	15,07	5,01	21,03	0,560	16,30	4,87	25,68	0,446
	Inundado	15,06	5,01	21,02	0,560	16,90	16,55	99,89	0,389
15,00 kN/m ³ / 15 % de Lodo	Natural	15,07	4,98	22,14	0,513	16,10	4,91	26,72	0,419
	Inundado	15,07	5,01	22,29	0,513	16,90	15,29	99,94	0,349

γ_d - peso específico aparente seco ; W – umidade; Sr - Grau de saturação; e - índice de vazios.

Tabela A.10- Índices físicos iniciais e finais dos corpos de prova dos ensaios Edométricos Duplos com amostras de solo e misturas solo-lodo compactadas com 17,00 kN/m³.

Peso Específico / % de Lodo		ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS				ÍNDICES FÍSICOS FINAIS			
		γ_d kN/m ³	W (%)	Sr (%)	e	γ_d kN/m ³	W (%)	Sr (%)	e
17,00 kN/m ³ / 0 % de Lodo	Natural	17,05	4,99	24,36	0,537	17,50	4,95	26,26	0,494
	Inundado	17,05	4,82	23,52	0,537	18,20	16,79	99,99	0,440
17,00 kN/m ³ / 5 % de Lodo	Natural	17,00	4,81	28,02	0,412	17,80	5,15	35,59	0,347
	Inundado	17,00	5,07	29,56	0,412	18,40	12,73	99,97	0,306
17,00 kN/m ³ / 10 % de Lodo	Natural	17,05	5,07	31,48	0,378	18,20	4,82	38,50	0,294
	Inundado	17,06	4,91	30,55	0,378	18,70	10,96	99,94	0,258
17,00 kN/m ³ / 15 % de Lodo	Natural	17,08	5,00	34,08	0,335	18,00	4,78	41,23	0,264
	Inundado	17,08	5,02	34,14	0,335	19,30	7,92	99,96	0,181

APÊNDICE B**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS CORPOS –DE- PROVA**

As características dos corpos- de - prova com agregado convencional e com adição de lodo nas proporções de 5 %, 10 % e 15 % para a relação a/c= 0,57, estão apresentados nas Tabelas B.1 a B.4 e Figuras B1 a B4.

Tabela B.1 – Características dos corpos- de - prova de concreto com agregado convencional a/c=0,57

Traço : 1:1,50:2,50						
Corpos de Prova	A – 0% Lodo			B – 0% Lodo		
Idade	7	14	28	7	14	28
Diâmetro médio (mm)	99,9	99,5	99,0	100,0	99,5	100,0
Altura média (mm)	195,0	197,5	196,5	192,5	198,0	196,5
Peso (kN)	0,0362	0,0362	0,0353	0,0356	0,0370	0,0364
Carga (kN)	157,20	207,38	250,75	157,24	184,86	18,158
Resistência (MPa)	20,06	26,67	32,57	20,02	25,06	23,12
Peso específico (kN/m ³)	23,60	23,60	23,30	23,50	23,80	23,60
Tempo de ultra-som (µs)	43,00	42,20	41,10	42,90	43,50	42,80
Velocidade da onda (km/s)	4,53	4,68	4,78	4,49	4,55	4,59
Índice Esclerométrico (média)	26	28	30	27	29	30
Consumo do cimento (Kg/m ³)	423,10					

Tabela B.2 – Características dos corpos- de - prova de concreto com agregado (areia + 5 % lodo) a/c=0,57

Traço - 1:1,51:0,08 :2,59						
Corpos de Prova	A - 5 % Lodo			B - 5 % Lodo		
Idade	7	14	28	7	14	28
Diâmetro médio (mm)	100	105,00	99,5	100	104,5	105,0
Altura média (mm)	193,0	195,5	197,0	194,0	195,0	197,5
Peso (kN)	0,0334	0,0346	0,0348	0,0336	0,0344	0,0349
Carga (kN)	131,19	180,89	182,50	121,47	163,74	190,90
Resistência (MPa)	16,70	20,89	23,62	15,47	19,09	22,05
Peso específico (kN/m ³)	22,03	20,40	22,70	22,06	20,50	20,40
Tempo de ultra-som (µs)	45,30	45,00	44,70	42,9	48,10	44,20
Velocidade da onda (Km/s)	4,26	4,34	4,41	4,19	4,05	4,67
Índice Esclerométrico (média)	25	23	25	24	27	25
Consumo do cimento (Kg/m ³)	371,28					

Tabela B.3 – Características dos corpos- de -prova de concreto com agregado (areia + 10 % lodo) a/c=0,57

Traço 1 : 1:1,32: 0,15 2,59						
Corpos de Prova	T1 - A - 10 % Lodo			T1 - B - 10 % Lodo		
Idade	7	14	28	7	14	28
Diâmetro médio (mm)	99,8	99,5	95,5	99,8	100,0	99,5
Altura média (mm)	194,0	197,0	196,5	191,0	197,5	196,0
Peso (kN)	0,0327	0,0332	0,033*	0,0324	0,033*	0,033*
Carga (kN)	977,4	115,14	111,28	955,00	111,47	141,37
Resistência (MPa)	12,19	14,81	15,54	12,21	14,19	18,18
Peso específico (kN/m ³)	21,56	21,70	23,40	21,66	21,40	21,60
Tempo de ultra-som (µs)	48,90	48,20	47,90	49,40	49,40	46,5
Velocidade da onda (Km/s)	3,97	4,09	41,02	3,87	4,00	42,15
Índice Esclerométrico (média)	19	20	20	18	19	21
Consumo do cimento (Kg/m ³)	388,75					

* corpos-de-prova com pequenas avarias

Tabela B. 4– Características dos corpos- de- prova de concreto com agregado (areia + 15 % lodo) a/c=0,57

Traço - 1:0,80:0,14:2,59						
Corpos de Prova	T1 - A - 15 % Lodo			T1 - B - 15 % Lodo		
Idade	7	14	28	7	14	28
Diâmetro médio (mm)	100,00	99,5	99,5	100,00	99,5	99,5
Altura média (mm)	192,0	196,0	195,0	190,00	196,5	196,0
Peso (kN)	0,0303	0,0314*	0,0303	0,0299	0,0311	0,0305
Carga (kN)	925,10	968,90	132,56	842,10	114,70	141,15
Resistência (MPa)	11,78	12,46	17,05	10,72	14,75	18,15
Peso específico (kN/m ³)	20,07	20,60	20,00	20,01	20,40	20,00
Tempo de ultra-som (µs)	54,10	51,90	50,1	53,90	51,30	50,3
Velocidade da onda (Km/s)	3,55	3,78	3,89	3,52	3,83	3,92
Índice Esclerométrico (média)	20	20	19	20	19	22
Consumo do cimento (Kg/m ³)	395,69					

* corpos-de-prova com pequenas avarias

São apresentadas as características dos corpos- de - prova com agregado convencional e com adição de lodo nas proporções de 5 % 10 % e 15 % para a relação a/c= 0,65 nas Tabelas B.5 a B.8 e Figuras B.5 a B.8.

Tabela B.5– Características dos corpos- de - prova de concreto com agregado convencional a/c=0,65

Corpos de Prova	Traço - 1:2,33:2,85					
	T2 - A - 0 % Lodo			T2 - B - 0 % Lodo		
Idade	7	14	28	7	14	28
Diâmetro médio (mm)	99,5	99,0	99,0	99,0	99,0	99,5
Altura média (mm)	194,5	196,0	196,0	195,5	198,5	199,0
Peso (kN)	0,0353	0,0354	0,0355	0,0355	0,0360	0,0359
Carga (kN)	143,84	155,89	157,28	154,83	150,21	175,91
Resistência (MPa)	18,50	23,50	23,50	20,11	19,51	22,62
Peso específico (kN/m ³)	23,40	23,35	23,35	23,60	23,60	23,20
Tempo de ultra-som (µs)	43,1	42,3	41,80	43,0	42,7	42,0
Velocidade da onda (Km/s)	4,51	4,63	4,69	4,55	4,65	4,74
Índice Esclerométrico (média)	23	25	27	23	24	20
Consumo do cimento (Kg/m ³)	342,85					

Tabela B.6– Características dos corpos-de-prova de concreto com agregado (areia + 5 % lodo) a/c=0,65

Corpos de Prova	Traço - 1:2,21:0,12:2,34					
	A - 5 % Lodo			B - 5 % Lodo		
Idade	7	14	28	7	14	28
Diâmetro médio (mm)	99,0	99,5	100,5	99,5	99,0	100,0
Altura média (mm)	190,5	195,5	194,0	191,5	195,0	95,0
Peso (gf)	0,0322	0,0331	0,0333	0,0325	0,0327	0,0330
Carga (Kgf)	118,44	125,81	131,50	108,14	124,45	104,64
Resistência (MPa)	15,38	16,18	16,58	13,90	16,17	13,32
Peso específico (KN/m ³)	21,90	21,80	21,60	21,80	21,80	21,50
Tempo de ultra-som (µs)	46,20	47,60	47,4	47,90	48,20	48,2
Velocidade da onda (Km/s)	4,12	4,11	4,09	4,00	4,05	4,05
Índice Esclerométrico (média)	16	20	20	18	19	22
Consumo do cimento (Kg/m ³)	343,88					

Tabela B.7– Características dos corpos-de-prova de concreto com agregado (areia + 10 % lodo) a/c=0,65

Traço - 1:1,44:0,16:2,34						
Corpos de Prova	A - 10 % Lodo			B - 10 % Lodo		
Idade	7	14	28	7	14	28
Diâmetro médio (mm)	99,0	99,5	102,5	99,5	98,5	99,0
Altura média (mm)	194,0	195,5	194,0	195,0	197,0	96,0
Peso (kN)	0,0321	0,0326	0,0331	0,0330	0,0325	0,0332
Carga (kN)	944,30	933,90	100,43	784,80	100,60	101,69
Resistência (MPa)	12,26	12,01	12,17	10,09	13,20	13,21
Peso específico (kN/m ³)	21,50	21,40	20,60	21,80	21,80	22,0
Tempo de ultra-som (µs)	50,3	49,1	48,50	51,2	50,4	48,7
Velocidade da onda (Km/s)	3,86	3,98	4,00	3,81	3,91	4,02
Índice Esclerométrico (média)	19	19	22	20	19	20
Consumo do cimento (Kg/m ³)	384,91					

Tabela B.8 – Características dos corpos-de-prova de concreto com agregado (areia + 15 % lodo) a/c=0,65.

Traço - 1:1,08:0,19:2,14						
Corpos de Prova	A - 5 % Lodo			B - 15 % Lodo		
Idade	7	14	28	7	14	28
Diâmetro médio (mm)	98,5	98,5	100,0	100,0	100,0	99,5
Altura média (mm)	195,0	197,0	196,5	196,0	198,5	193,5
Peso (kN)	0,0320	0,0325	0,0325	0,0322	0,0322	0,0326
Carga (kN)	809,50	912,70	999,70	856,60	895,20	100,09
Resistência (MPa)	10,62	11,98	12,73	10,91	11,40	12,87
Peso específico (kN/m ³)	21,60	21,60	21,0	20,90	20,6	21,70
Tempo de ultra-som (µs)	52,30	50,90	50,20	52,60	50,40	48,90
Velocidade da onda (Km/s)	3,73	3,87	3,91	3,73	3,94	3,96
Índice Esclerométrico (média)	19	19	20	19	19	20
Consumo do cimento (Kg/m ³)	419,63					

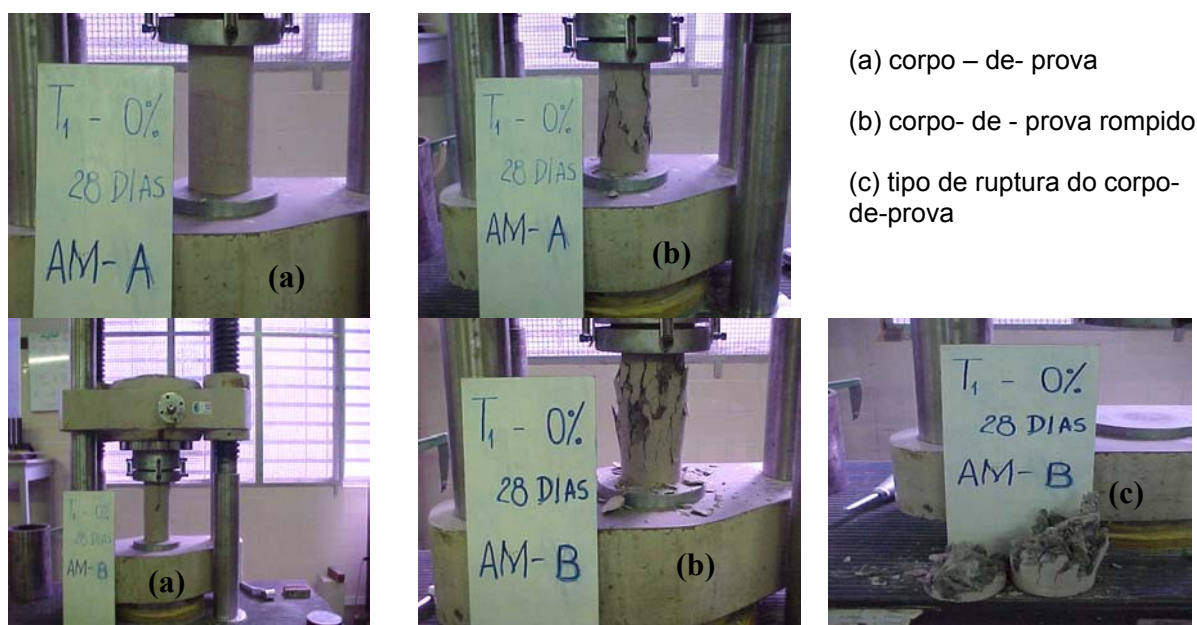


Figura B.1 – corpos-de-prova com agregado convencional ($a/c=0,57$)

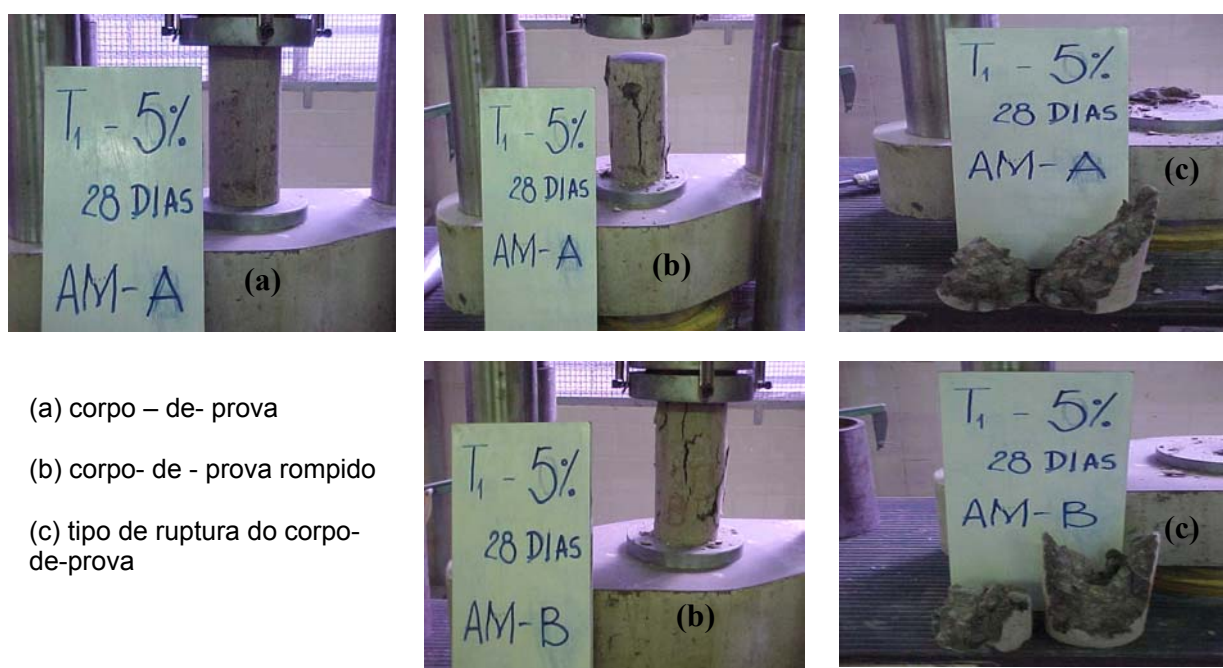


Figura B.2– corpos-de-prova com solo-5% de lodo ($a/c=0,57$)

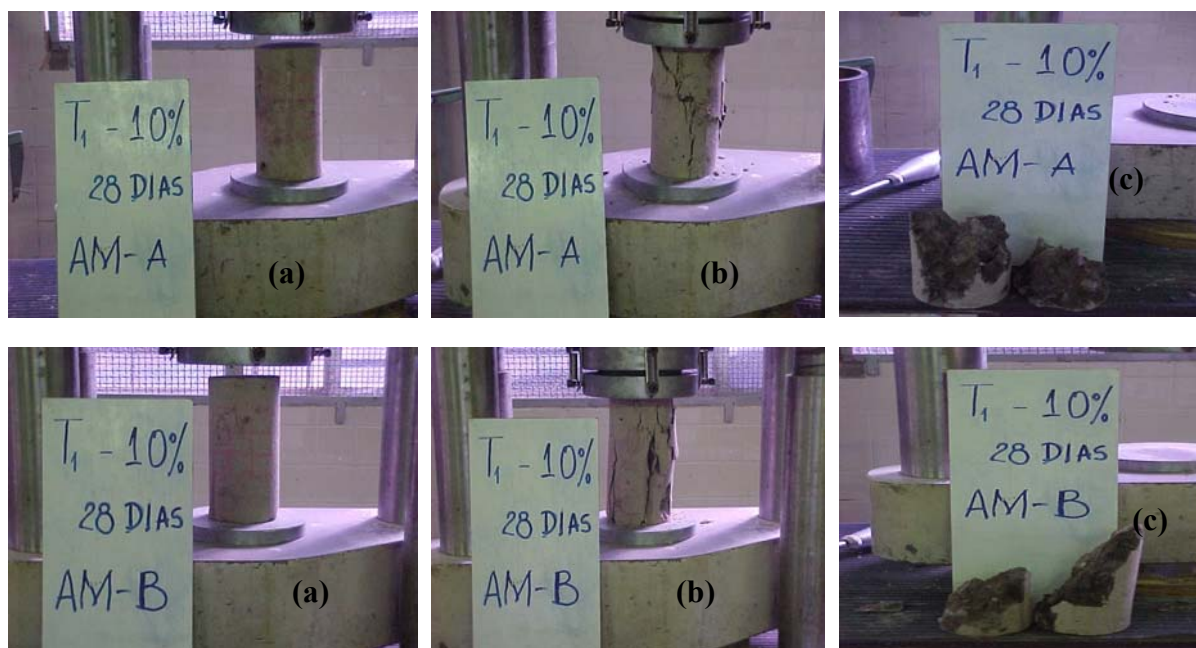


Figura B.3– corpos-de-prova com solo-10% de lodo ($a/c=0,57$): (a) corpo-de-prova na prensa; (b) corpo-de-prova rompido; (c) tipo de ruptura do corpo-de-prova.

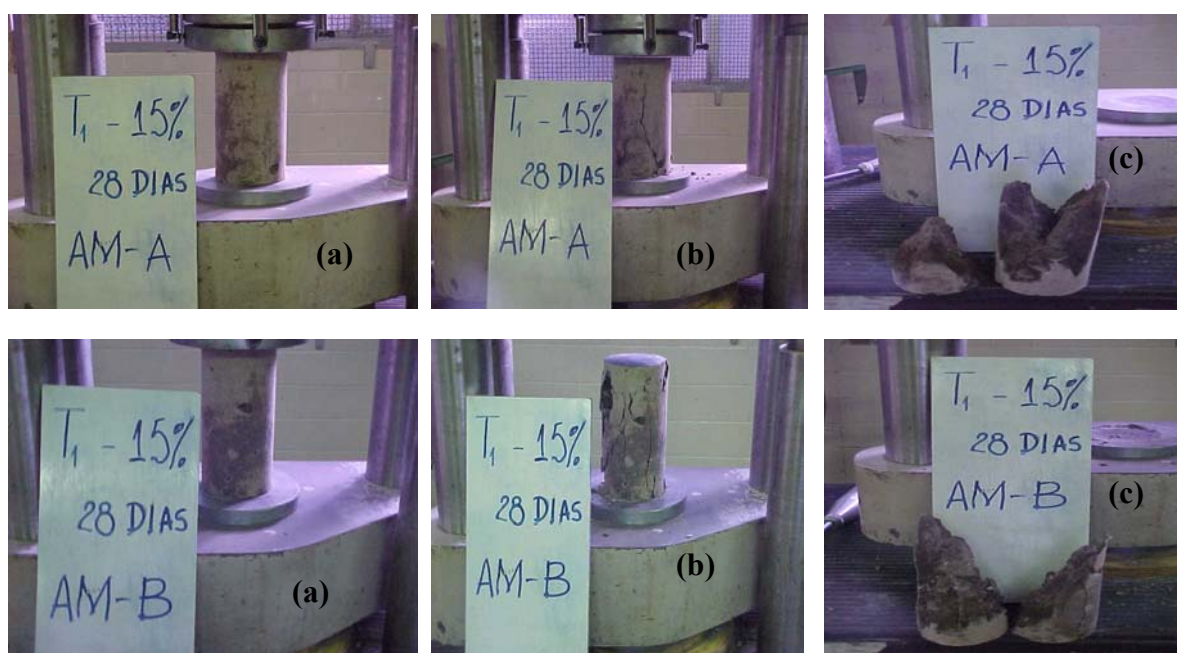


Figura B.4– corpos-de-prova com solo-15% de lodo ($a/c=0,57$): (a) corpo-de-prova na prensa; (b) corpo-de-prova rompido; (c) tipo de ruptura do corpo-de-prova.

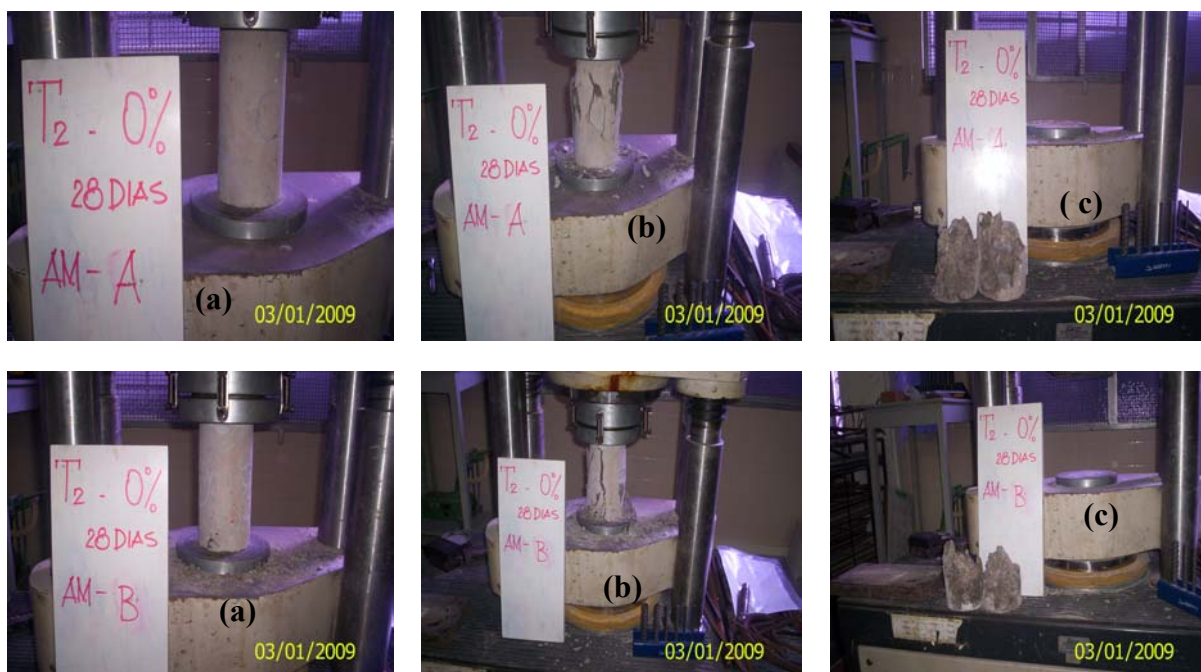


Figura B.5 – corpos-de-prova com agregado convencional ($a/c=0,65$): (a) corpo-de-prova na prensa; (b) corpo-de-prova rompido; (c) tipo de ruptura do corpo-de-prova .

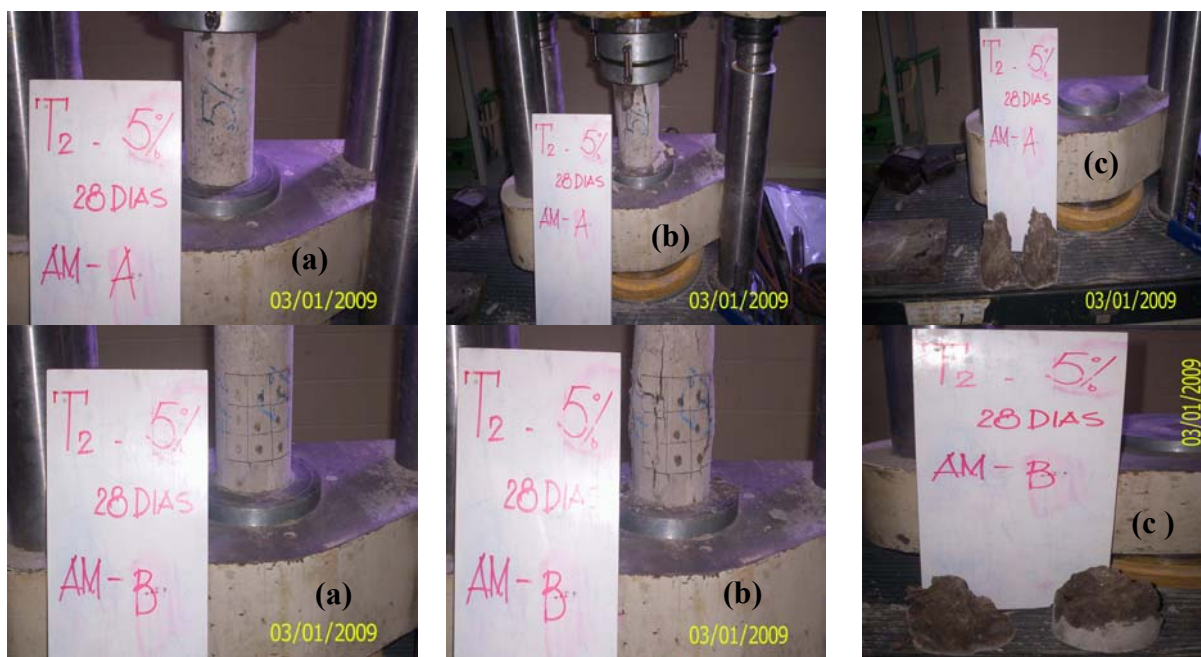


Figura B.6– corpos-de-prova com solo-5% de lodo ($a/c=0,65$): (a) corpo-de-prova na prensa; (b) corpo-de-prova rompido; (c) tipo de ruptura do corpo-de-prova.

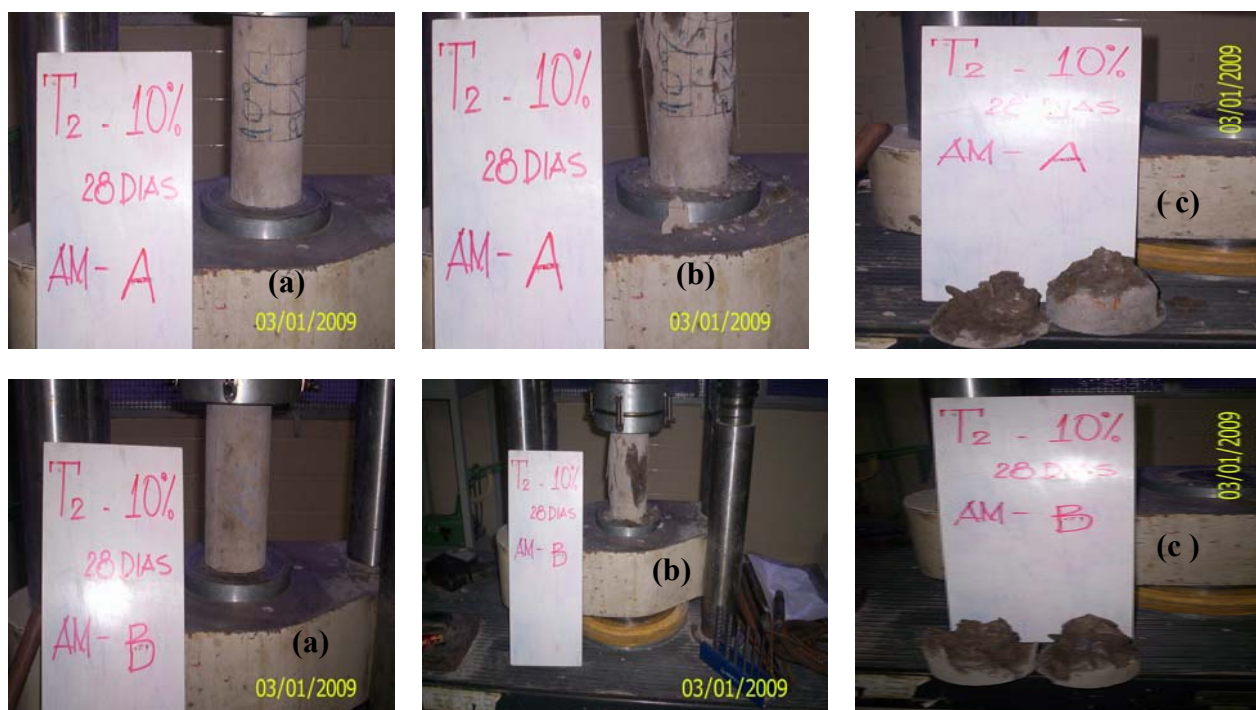


Figura B.7– corpos-de-prova com solo-10% de lodo ($a/c=0,65$): (a) corpo-de-prova na prensa; (b) corpo-de-prova rompido; (c) tipo de ruptura do corpo-de-prova.

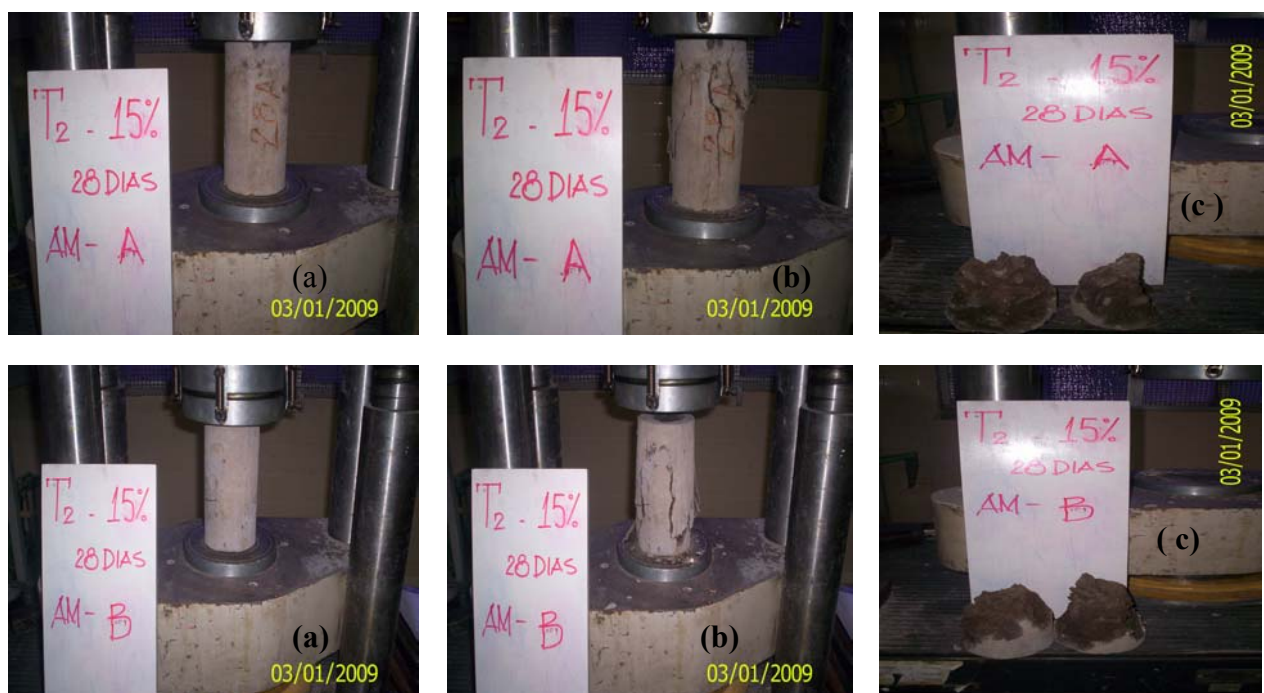


Figura B.8 – corpos-de-prova com solo-15% de lodo ($a/c=0,65$): (a) corpo-de-prova na prensa; (b) corpo-de-prova rompido; (c) tipo de ruptura do corpo-de-prova.

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](#)