

	<p>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE</p> <p>CENTRO DE TECNOLOGIA</p> <p>PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL</p>
---	--

Kiev Luiz de Araújo Pereira

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COM CIMENTO E CINZA DE LODO
PARA USO EM PAVIMENTOS.**

Natal

2012

Kiev Luiz de Araújo Pereira

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COM CIMENTO E CINZA DE LODO
PARA USO EM PAVIMENTOS**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dr. Maria del Pilar Durante Ingunza.

Co-Orientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior.

Natal

2012

Seção de Informação e Referência

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Pereira, Kiev Luiz de Araújo

Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos / Kiev Luiz de Araújo Pereira. – Natal, RN, 2012.

125 f. : il.

Orientadora: Maria Del Pilar Durante Ingunza.

Co-orientador: Olavo Francisco dos Santos Júnior.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Solo-cimento – Dissertação. 2. Estabilização química do solo – Dissertação. 3. Lodo de esgoto calcinado – Dissertação. I. Ingunza, Maria Del Pilar Durante. II. Santos Junior, Olavo Francisco dos. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

KIEV LUIZ DE ARAÚJO PEREIRA

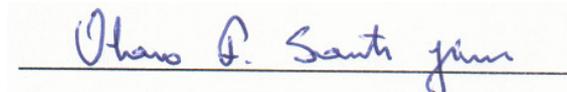
**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COM CIMENTO E CINZA DE LODO
PARA USO EM PAVIMENTOS**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA



Prof^a. Dr^a. Maria del Pilar Durante Ingunza – Orientadora (UFRN)



Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior – Examinador Interno (UFRN)



Prof. Dr. Moacir Guilhermino da Silva – Examinador Externo ao programa (UFRN)



Prof. Dr. Gregório Luís Silva de Araújo – Examinador Externo (UnB)

Natal, 27 de dezembro de 2012.

ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COM CIMENTO E CINZA DE LODO PARA USO EM PAVIMENTOS

Kiev Luiz de Araújo Pereira

Orientadora: Prof. Dr. Maria del Pilar Durante Ingunza

Co-Orientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da estabilização química de um solo com cimento e a avaliação do uso de cinza de lodo como aditivo estabilizante, investigando o comportamento mecânico das misturas solo-cimento e solo-cimento-cinza para uso em base e sub-base de pavimentos rodoviários. Os materiais envolvidos no estudo foram: solo silte-areno argiloso, cimento Portland comum e lodo esgoto calcinado de uma lagoa anaeróbia.

A metodologia envolveu o estudo dos materiais, com ensaios de caracterização geotécnica do solo e mecânica das misturas solo-cimento e solo-cimento-cinza de lodo (SCCLE). As moldagens dos corpos de prova para o ensaio de compactação do solo e solo-cimento foram nas energias normal, intermediária e modificada e os teores de cimento adicionados ao solo foram 0%, 3%, 6% e 9%, no qual para cada traço/energia foram moldados 3 cp's, sendo nesta etapa confeccionados 36 cp's. A adição em percentual do cimento ao solo foi feita em relação massa do solo seco. Com os pontos da umidade retirados da curva de compactação do solo na energia normal, foram moldados 5 cp's para o ensaio de CBR. O melhor resultado foi o do cp com umidade próxima a da umidade ótima. Seu valor foi de 6,13% e obteve-se expansão de 0,02%. Foi verificado a partir dos resultados do ensaio de CBR do solo a necessidade de sua estabilização tendo em vista que para o uso em camadas de

sub-base e base são exigidos valores mínimos de 20% e 80% respectivamente segundo a especificação do DNER – ES – 301/97.

No estudo da estabilização do solo foi utilizada como referência a resistência mínima à compressão simples para base e sub-base que é de 21 kgf/cm² de acordo com a especificação de serviço ES – 305/97 do DNER. O traço T₄I foi o escolhido para adição de cinza, composto por 91% de solo + 9% de cimento na energia intermediária, cuja resistência foi de 22,61 kgf/cm² e este valor lhe credenciou aos padrões de camadas de base e sub-base. A adição cinza de lodo foi feita nos percentuais de 5%, 10%, 20% e 30% e o percentual de cinza foi calculado em relação à massa do solo seco, tendo sido nesta fase moldados 12 cp's. Foi observado incremento da RCS em todos os traços contendo a cinza, sendo mais satisfatório o traço T₇I com um ganho de 25,87% de resistência em relação ao traço T₄I de referência contendo solo-cimento.

A partir do estudo de estabilização podemos inferir que o solo não é expansivo podendo ser usado em camadas de pavimentos após a estabilização com cimento e a cinza de lodo pode ser usada como aditivo estabilizante, visando reduzir os custos com o cimento e diminuir a poluição com o descarte do resíduo no meio ambiente.

Palavras-Chave: Solo-cimento; Estabilização química de solo; Lodo de esgoto Calcinado.

STABILIZATION OF A SOIL WITH CEMENT AND ASH SLUDGE FOR USE IN PAVEMENT

Kiev Luiz de Araújo Pereira

Adviser: Prof. Dr. Maria del Pilar Durante Ingunza

Co-adviser: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior

ABSTRACT

This work presents a study of the chemical stabilization of soil with cement and evaluating the use of gray sludge as an additive stabilizer, investigating the mechanical behavior of soil-cement mixtures and soil-cement-gray for use in base and sub-base pavement road. The materials involved in the study were: soil silt-sandy loam, ordinary Portland cement and sewage sludge calcined in an anaerobic lagoon.

The methodology involved the study of materials with geotechnical characterization tests of soil and mechanical mixtures of soil-cement and soil-cement-gray sludge (SCCLE). The casts of specimens for testing soil compaction and soil-cement energies were normal, and intermediate levels and modified cement added to the soil were 0%, 3%, 6% and 9%, in which for each trace / 3 power were shaped cp's being made at this stage cp 36's. The addition percentage of the cement in the soil mass has been made regarding dry soil. With the points of moisture removed from the curve of soil compaction on normal power, 5 cp's were cast for the CBR test. The best result was the cp with humidity close to the optimum moisture content. Its value was 6.13% and was obtained as expansion of 0.02%. It was found from the results of the CBR test soil the need to stabilize considering that for the use of layered sub-

base and base are required minimum values of 20% and 80% respectively according to the specification of DNER - ES - 301/97.

In the study of soil stabilization was used as reference the minimum resistance to compressive base and sub-base that is 21 kgf/cm² according to the service specification ES - 305/97 DNER. The trace T₄I was chosen for addition of gray, composed of 91% + 9% of soil cement in intermediate energy, whose resistance was 22.61 kgf/cm², and that figure would accredited standards of base layers and sub-base. The addition was made sludge ash in the percentages of 5%, 10%, 20% and 30% and the percent ash was calculated relative to the mass of dry soil, this stage having been molded cp 12 s. Increase was observed in the RCS all traces containing ash, being more satisfactory trace T₇I with a gain of 25.87% strength relative to the reference trace T₄I containing soil-cement.

From the study of stabilization can infer that the soil is not expansive and can be used in pavement layers after stabilization with cement and gray sludge can be used as a stabilizing additive, to reduce the cost of cement and reduce pollution with Disposal of waste into the environment.

Keywords: Soil-cement; Chemical stabilization of soil, sewage sludge Calcined.

Ao bom Deus primeiramente por ter me dado vida e saúde para poder realizar mais um dos meus objetivos e a minha querida mãe Maria Betânia de Araújo Pereira.

AGRADECIMENTOS

Aos meus Pais Maria Betânia de Araújo Pereira e Francisco Luiz Pereira, meu Irmão Ranieri de Araújo Pereira pela compreensão e apoio em todas as fases de minha vida, no qual sempre estiveram comigo participando dos melhores momentos e os de superação. Ensinarão de certa forma que a vida é uma luta, e que não ganha quem bate mais, mas o que suporta apanhar mais, persistindo e superando as dificuldades, mostrando resiliência.

Ao meu querido filho Kayron José que me fez pensar mais no futuro e trazendo mais responsabilidade em minha vida, no qual todo esforço é dedicado a ele para que possa ter como uma das suas referências de vida a busca pelo conhecimento.

Aos meus Avós maternos Geralda Teixeira de Araújo e Heronides Alves de Araújo e aos Avós paternos Luiz Pereira Barros Olívia Alves Pereira pela transmissão de conhecimento e experiência de vida.

A todos da minha família, tios, primos que participaram efetivamente nas minhas conquistas.

Aos professores do Mestrado do PEC, Colegas e Técnicos, os quais participaram da minha formação o meu reconhecimento a todos os Mestres do Departamento de Engenharia Civil da conceituada Universidade, em especial aos Professores Olavo Francisco dos Santos Júnior e Maria del Pilar Durante Ingunza que me orientaram em toda a pesquisa.

Aos Técnicos em especial Batista do Laboratório de Solos e Sr. Francisco do Laboratório de Concreto do DEC-UFRN.

Aos bolsistas que me ajudaram nos ensaios, em especial a João Paulo e Robson sem eles a tarefa seria mais árdua.

Aos órgãos de fomento e pesquisa CAPES e CNPq, pela bolsa e incentivo a cursar o mestrado que sem o fomento e o auxílio ficaria difícil continuar.

“O que move a vida não é a busca pela felicidade, mas a busca pelo conhecimento, combustível que nos move.”

Kieu Luiz

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
1.1 Objetivo Geral	3
1.1.1 Objetivos Específicos	3
1.2 Relevância e Justificativa	4
1.3 Organização do Trabalho	5
CAPÍTULO 2	6
Revisão da Literatura	6
2.1 Esgoto	6
2.1.1 Tipos de Esgotos.....	6
2.1.2 Tratamento de Esgotos	6
2.1.2.1 ETE	7
2.1.2.2 Lagoa de Estabilização	8
2.1.2.3 Lagoa Anaeróbia	8
2.1.2.4 Leito de Secagem	9
2.1.3 Composição química do esgoto	10
2.2 Lodo de Esgoto	10
2.2.1 Caracterização físico-química do lodo in natura.....	12
2.2.2 Produção e gerenciamento do lodo.....	15
2.2.3 Contaminantes do lodo	15
2.2.3.1 Os Metais pesados.....	16
2.2.3.2 Os Microrganismos	16
2.2.4 Processo térmico de higienização do lodo	17
2.3 Disposição final dos lodos de esgotos	17
2.3.1 Incineração do lodo	22
2.3.1.1 Composição química do lodo incinerado.....	22
2.3.1.2 Caracterização do lodo incinerado	24

2.3.1.2.1 Volatilidade do lodo incinerado.....	24
2.3.1.3 Classificação geotécnica da Cinza de lodo ETE IAPI/RS	24
2.3.1.4 Caracterização química do lodo incinerado.....	26
2.3.1.4.1 Difractometria de raios-X.....	26
2.4 Resíduos sólidos	28
2.5 Estabilização de solos para uso em pavimentos.....	29
2.5.1 Estabilização mecânica.....	29
2.5.2 Estabilização física.....	30
2.5.3 Estabilização química.....	30
2.5.3.1 Solo cimento.....	31
2.5.3.1.1 Adições pozolanas ao cimento e concreto	35
2.5.4 Pavimento e suas particularidades.....	38
2.5.4.1 Classificação dos pavimentos	39
2.5.4.2 Classificação dos solos na pavimentação	40
2.6 Uso de resíduos sólidos e cinzas na construção e pavimentação	43
2.6.1 Utilização de solo-cinza de casca de arroz em pavimentos	46
2.6.1.1 Pesquisa com cinza de casca de arroz	47
2.6.2 Utilização de Solo cinza-carvão em pavimentos	47
2.6.2.1 Pesquisas utilizando cinza de carvão na pavimentação	48
2.6.3 Utilização de solo-cinza de RSU em pavimentos	50
2.6.3.1 Pesquisas utilizando RSU em pavimentos	51
2.6.4 Adição de cinza de lodo de esgoto na produção de cimento, concreto e pavimentos	53
2.6.4.1 Pesquisas utilizando cinza de lodo.....	54
2.6.4.1.1 Adição de cinza de lodo a concreto.....	54
2.6.4.1.2 Cimento produzido a partir de cinza de lodo	55
2.6.4.1.3 Adição de Cinza de lodo para produção de concreto de alto desempenho.....	56
2.6.4.1.4 Adição de Cinza de lodo e lodo na pavimentação.....	56
CAPÍTULO 3	58
Materiais e Métodos	58
3.1 Materiais.....	58

3.1.1 Coleta e preparação dos materiais.....	60
3.1.1.1 Solo	60
3.1.1.2 Aglomerante	61
3.1.1.3 Lodo	61
3.2 Metodologia.....	63
3.2.1 Caracterização física e química dos materiais	64
3.2.1.1 Massa específica real dos grãos	64
3.2.1.2 Limites de Atterberg	65
3.2.1.3 Análise Granulométrica	65
3.2.1.4 Análise Química	65
3.2.2 Estudo do comportamento mecânico do solo e das misturas SC e SCCLE	65
3.2.2.1 Estudo do comportamento mecânico do solo e SC.....	65
3.2.2.1.1 Ensaio de Compactação solo e SC.....	65
3.2.2.1.2 Ensaio CBR do solo	67
3.2.2.1.3 Ensaio de Compressão Simples do solo e SC	67
3.2.2.2 Estudo do comportamento mecânico da mistura SCCLE	68
3.2.2.2.1 Ensaio de compressão simples do SCCLE.....	68
CAPÍTULO 4	71
Apresentação e Análise dos Resultados.....	71
4.1 Caracterização física e química dos materiais	71
4.1.1 Massa específica dos sólidos.....	71
4.1.2 Volatilidade do lodo calcinado	72
4.1.3 Limites de Consistência	72
4.1.4 Análise Granulométrica	73
4.1.5 Classificação do solo quanto a pavimentação.....	74
4.1.6 Análise química	74
4.2 Ensaio de caracterização mecânica do Solo e Solo-Cimento (SC).....	77
4.2.1 Ensaio de Compactação	77
4.2.2 Ensaio CBR do solo	81
4.2.3 Ensaio de Compressão Simples Solo e SC	82

4.2.4 Ensaios de caracterização mecânica das misturas Solo-Cimento-Cinza de Lodo (SCCLE)	86
4.2.4.1 Ensaio de compressão simples do SCCLE	86
CAPÍTULO 5	91
Conclusões e Recomendações.....	91
CAPÍTULO 6	93
Referências bibliográficas	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma de uma estação de tratamento tradicional.....	8
Figura 2.2 – Lagoa anaeróbia situada às margens do Km-6 da BR 226, município de Natal/RN.....	9
Figura 2.3 – Leito de secagem do lodo da lagoa anaeróbia do km-6 da BR 226.....	9
Figura 2.4 – Percentual do custo médio das formas de disposição final de lodo de esgoto em relação ao custo médio de lançamento oceânico.....	20
Figura 2.5 – Distribuição granulométrica da cinza de lodo ETE IAPI/RS.	25
Figura 2.6 – Curva de compactação para a cinza, massa específica seca x umidade, adaptado de Geyer (2001).	26
Figura 2.7 – Classificação dos Solos (Transportation Research Board).	41
Figura 2.8 – Gráfico de plasticidade da classificação SUCS.....	43
Figura 2.9 – Efeito do tempo de cura sobre o solo estabilizado com CVRSU, cal e cimento.....	52
Figura 3.1 – Localização da jazida próxima à estrada do distrito Pium Parnamirim/RN.....	59
Figura 3.2 – Localização da lagoa anaeróbia, próxima ao km-6 BR 226, Natal/RN..	59
Figura 3.3 – Solo de coloração avermelhada.....	60
Figura 3.4 – Sacos contendo solo da pesquisa.....	61
Figura 3.5 – Lodo coletado.....	62
Figura 3.6 – Local da coleta do lodo.	62
Figura 3.7 – Lodo calcinado.	63
Figura 3.8 – Fluxograma da pesquisa.	64
Figura 3.9 – Corpo de prova do solo natural (Ensaio de compactação).....	66
Figura 3.10 – Corpos de prova armazenados em sacos para a cura úmida.	68
Figura 4.1 – Análise Granulométrica do solo.	73
Figura 4.2 – Difrátograma apresentando as fases identificadas na amostra de solo da jazida próximo à Parnamirim/RN.....	75
Figura 4.3 – Difrátograma apresentando as fases identificadas na amostra do lodo de esgoto da lagoa anaeróbia próximo ao km 6 da BR-226.	76
Figura 4.4 – Curvas de compactação Solo.	78

Figura 4.5 – Curvas de compactação S97C3.....	78
Figura 4.6 – Curvas de compactação S94C6.....	79
Figura 4.7 – Curvas de compactação S91C9.....	79
Figura 4.8 – Valores de CBR energia normal nas várias umidades do ensaio de compactação do solo.	81
Figura 4.9 – Resistência à compressão simples solo-cimento por traço e energia no ensaio de RCS.	85
Figura 4.10 – Variação da massa específica nos traços e energias do ensaio de RCS.....	86
Figura 4.11 – Resistência à compressão simples solo-cimento-cinza por traço.	88
Figura 4.12 – Variação da massa específica seca dos traços SC9CLE% no ensaio de RCS.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de parâmetros de carga orgânica em (mg/l) do esgoto sanitário.	10
Tabela 2.2 – Características dos lodos de ETE.	11
Tabela 2.3 – Composição química típica do lodo de esgoto.....	12
Tabela 2.4 – Caracterização de lodos Natal/RN, Florianópolis/SC e Joinville/SC, respectivamente.	13
Tabela 2.5 – Volume de lodo produzido nos diversos tipos de tratamento.	15
Tabela 2.6 – Vantagens e desvantagens das alternativas de disposição do lodo. ...	18
Tabela 2.7 – Comparação dos custos de diferentes alternativas de disposição final do lodo de esgoto.....	19
Tabela 2.8 – Principais meios de disposição do lodo nos países.	21
Tabela 2.9 – Composição química de lodos incinerados a 550°C.	23
Tabela 2.10 – Resíduos obtidos após incineração a 550°C de lodo seco em estufa.	24
Tabela 2.11 – Parâmetros da cinza de lodo da ETE IAPI/RS.	25
Tabela 2.12 – Minerais presentes na amostra de lodo da ETE IAPI, adaptado de Geyer (2001).	26
Tabela 2.13 – Análise química de típicos materiais pozolânicos, naturais e subprodutos.....	27
Tabela 2.14 – Percentual dos componentes presentes no cimento Portland.....	32
Tabela 2.15 – Classificação das adições pozolânicas de acordo com suas características.	37
Tabela 2.16 – Combinação de vários resíduos materiais/aplicações em pavimento.	45
Tabela 3.1 – Traços com percentual de cada material e energia de compactação para definição das curvas de compactação solo-cimento.	66
Tabela 3.2 – Relação da quantidade de corpos de prova e traços por ensaio com as composições dos materiais.	69
Tabela 3.3 – Relação das normas para ensaio de caracterização do solo.	70
Tabela 3.4 – Relação das normas para ensaio de caracterização mecânica das misturas.....	70
Tabela 4.1 – Massa específica real dos materiais.	71

Tabela 4.2 – Resíduo obtido após calcinação a 550°C de lodo.	72
Tabela 4.3 – Limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade solo.	73
Tabela 4.4 – Porcentagens ensaio granulométrico.	74
Tabela 4.5 – Análise semiquantitativa da amostra de solo.	76
Tabela 4.6 – Análise semiquantitativa da amostra de lodo.	77
Tabela 4.7 – Tabela umidade ótima e massa específica máxima seca por traço e energia de compactação	80
Onde:	80
Tabela 4.8 – Variação do CBR e da expansão com o teor de umidade.....	82
Tabela 4.9 – Valores de CBR mínimos aceitáveis e expansões máximas para base e sub-base para pavimentos de grande tráfego.....	82
Tabela 4.10 – Traços utilizados para o ensaio de compressão simples nas misturas de solo-cimento.	83
Tabela 4.11 – Resistência à compressão simples dos traços solo-cimento.....	84
Tabela 4.12 – Valores médios de massa específica seca e teor de umidade dos corpos de prova dos ensaios de RCS.	85
Tabela 4.13 – Traços em para o ensaio de compressão simples SCCL.	87
Tabela 4.14 – Resistência à compressão simples dos traços solo-cimento-cinza de lodo de esgoto.....	87
Tabela 4.15 – Massa específica e umidade média dos traços solo-cimento-cinza do ensaio de RCS.	89

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Índice de Grupo.....	41
Equação 2.2 – Coeficiente de não uniformidade	42
Equação 2.3 – Coeficiente de curvatura	42
Equação 3.1 – Teor de cimento	65
Equação 3.2 – Teor de cinza	66

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

$w_{ót}$ – Umidade ótima

ρ_s – Massa específica dos sólidos

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACCA - American Coal Ash Association

ACE PLAN Japonês - Areawide Sewage Sludge Treatment and Disposal Project

ACI – American Concrete Institute

APE – Adição Pozolânica Estabilizante

BNH – Banco Nacional de Habitação

C2S – Silicato di cálcico

C3A – Aluminato tri cálcico

C3S – Silicato tri cálcico

C4AF – Ferro aluminato tetra cálcico

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR – Califórnia Bearing Ratio

C_c – Coeficiente de Curvatura

CCA – Cinza de Casca de Arroz

CLE – Cinza de Lodo de Esgoto

CNU – Coeficiente de Não Uniformidade

cp's - corpos de prova

CSH – Silicato de Cálcio Hidratado

CTGás-ER – Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis

CVRSU – Cinza Volante de Resíduo Sólido Urbano

D_{10} – Diâmetro Efetivo

D_{30} – Diâmetro Equivalente à Porcentagem de 30% de Solo que Passa

D_{60} – Diâmetro Equivalente à Porcentagem de 60% de Solo que Passa

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DEC/UFRN – Departamento de Engenharia Civil da UFRN
DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DQO – Demanda Química de Oxigênio
DRX – Difração de raios-X
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
FHWA - Federal Highway Administration
FRX – Fluorescência de raios-X
HRB - Highway Research Board
IG – Índice de Grupo
ISC – Índice de Suporte Califórnia
LARHISA – Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de Plasticidade
NBR – Norma Brasileira
O.D – Oxigênio Dissolvido
PEC/UFRN – Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRN
RCS – Resistência à Compressão Simples
 R_{RND} – Relação da Resistência Não Drenada
RSU – Resíduo Sólido Urbano
S%C% - Solo-cimento em percentual
S%C%CLE% - Solo-Cimento-Cinza de Lodo de Esgoto em percentual
SC – Solo-Cimento
SCCLE – Solo-Cimento-Cinza de Lodo de Esgoto
SUCS – Sistema Universal de Classificação dos Solos
 T_1 – Traço 1
 T_4I – Traço 4 na energia intermediária
 T_7I – Traço 7 na energia intermediária
UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

CAPÍTULO 1

Introdução

Um dos maiores desafios ambientais enfrentados pela população mundial é a gestão eficaz de resíduos sólidos, devido a sua grande produção e diversidade, ficando cada vez mais difícil pensar em um destino ecologicamente correto e sustentável. Os resíduos sólidos e líquidos urbanos (lixo de RSU, lodo de ETE, águas de origem industrial e doméstica) causam poluição nos centros urbanos por muitas vezes não terem a coleta, tratamento adequado, destino final ou utilização permitindo sua reciclagem (Geyer, 2001). A gestão adequada é muito importante, sendo o destino final uma preocupação e um desafio para gestores no mundo todo.

O destino final que se dá ao lodo é, portanto, uma atividade bastante importante e complexa, pois normalmente é extrapolada a capacidade das estações de tratamento e aterros, exigindo alternativas mais eficazes. De acordo com a legislação vigente em diversos países, inclusive a brasileira, a responsabilidade pelos problemas que podem ser causados pelo destino inadequado é sempre dos produtores do rejeito, os quais podem ser enquadrados na lei de crimes ambientais (Lei nº 9.605 de 12/02/98). Deste modo, alguns órgãos ambientais estão exigindo o detalhamento da alternativa de disposição final no processo de licenciamento das ETE's, o que representa um grande avanço na gestão ambiental e de resíduos do nosso País (PROSAB, 2001).

O desenvolvimento de pesquisas com lodo e novas técnicas de aproveitamento é uma realidade mundial. A busca por soluções ambientalmente corretas e economicamente viáveis para disposição final é um desafio, eliminar o resíduo de forma correta e reduzir os custos com o seu armazenamento é a maior preocupação atual dos gestores ambientais. A utilização do lodo de esgoto na construção civil é uma das saídas para o aproveitamento. O uso do lodo na construção pode ser observado na fabricação de vários materiais, no qual se podem citar trabalhos que justificam essa tendência. Tem-se a fabricação de agregados leves de Brosch *apud* Geyer (2001), matéria prima para fabricação de aglomerante hidráulico de Tay & Show *apud* Geyer (2001), usado na fabricação de cerâmica na

pesquisa de Alleman & Berman (1984) e em misturas asfálticas Al Sayed *et al.* (2005), no uso como matéria prima em mistura asfáltica Medeiros (2006) dentre outros trabalhos. A utilização do lodo na forma de cinzas pode acrescentar melhorias aos materiais.

A procura por materiais, a serem usados em camadas de base e sub-base que se adequem às especificações das normas rodoviárias vigentes no Brasil representam um grande problema para órgãos rodoviários locais tal qual é o problema da disposição e aproveitamento dos resíduos sólidos. Muitas vezes a falta de materiais granulares ou a sua grande distância do local de construção das vias acabam tornando inviável o uso em pavimentos. Dessa forma, surge a necessidade de utilizar solos menos nobres, estabilizando-os com aglomerantes e resíduos que melhorem suas propriedades.

O uso de cal e cimento, como estabilizantes químicos, visa garantir melhorias nas propriedades dos solos finos, em alguns casos a adição de materiais pozolânicos, as cinzas, de maneira geral são usadas para este fim. Reduzir os custos da estabilização e dar destino aos resíduos constitui-se uma tendência para as obras rodoviárias em todo mundo.

Pesquisa com lodo calcinado para obtenção de cimento realizada por Tay & Show (1991) aponta que as cinzas do material possuem atividade pozolânica.

A utilização da cinza pode melhorar as propriedades do solo e dar um destino adequado e ecologicamente correto, diminuindo a poluição do meio ambiente.

Neste contexto, o presente trabalho que é tema de dissertação do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRN, tem por finalidade estabilizar um solo de granulação fina (silte-areno argiloso) situado no município de Parnamirim/RN. Para isto, foi estudado o teor de cimento ótimo e a melhor energia de compactação para o solo. Após atingir as especificações de uso em base e sub-base de pavimentos, foi usada cinza de lodo de uma lagoa de estabilização anaeróbia situada próximo ao km-6 da BR 226. Foram utilizados vários teores de cinza na mistura solo-cimento ideal, a fim de dar um destino ao rejeito e com uma perspectiva de ganho nas propriedades mecânicas do solo estabilizado, ou na pior das hipóteses o resíduo não alterar as propriedades do solo-cimento estabilizado.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do estudo é avaliar o potencial da utilização de cinza de lodo em proporções pré-definidas incorporadas a uma mistura solo-cimento ideal para uso em base e sub-base de pavimentos rodoviários.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram estabelecidos, como segue:

- Caracterização química, geotécnica do solo e sua classificação quanto ao uso em pavimentos;
- Estudo dos parâmetros físico, químico e mecânico do solo e das misturas solo-cimento e solo-cimento-cinza utilizadas na pesquisa, possibilitando verificar principalmente os mecanismos de reação entre os materiais;
- Comparar os resultados obtidos com e sem adição de cinza de lodo a mistura solo-cimento;

1.2 Relevância e Justificativa

A construção civil, por ser grande consumidora de matéria-prima, vem cada vez mais sendo responsável pelo incentivo do processo de reciclagem de resíduos (Ceccato, 2003). Devido à alta demanda por agregados utilizados na indústria da construção, materiais provenientes de pedreiras e jazidas de solo estão cada vez mais difíceis. Assim muitas vezes é necessário utilizar materiais locais, solos finos, tipicamente argilosos, muito embora, estes não atendam as especificações de uso.

A grande produção de lodo de esgoto junto com a preocupação ambiental com o destino final deste resíduo tem instigado pesquisadores de todo mundo a buscarem formas adequadas de gestão, uma delas é a queima e aproveitamento das cinzas na construção civil.

O estudo procura estabilizar quimicamente um solo de uma jazida com localização estratégica que não atende as especificações de material para uso em camadas de rodovias. A jazida está situada às proximidades da BR-101, rodovia que recebeu constantes investimentos do governo federal para reforma e duplicação por ser via de grande tráfego. Pode ser explorada, pois sua distância para exploração é economicamente viável. O Cimento Portland comum, CP II – Z – 32, foi o aglomerante hidráulico utilizado que dará as partículas do solo cimentação e melhoria na resistência. O lodo calcinado foi utilizado como aditivo pozolânico estabilizante (APE), coletado de uma lagoa de estabilização anaeróbia situada próxima ao km-6 da BR 226, a cinza foi adicionada em várias proporções juntamente com a mistura solo-cimento ideal.

O uso do lodo foi na forma de cinzas, queimado a uma temperatura média de 550°C, durante duas horas, eliminando a matéria orgânica e os agentes patogênicos. Espera-se com a pesquisa reduzir futuramente o descarte do resíduo no meio ambiente, atenuar custos com estabilização de solos finos usando cimento, caso o resíduo confira melhoria a mistura. Espera-se ainda que o solo em estudo possa ser explorado, servindo de referência para futuras pesquisas.

1.3 Organização do Trabalho

O trabalho foi dividido em 5 (cinco) capítulos, seguindo a ordem conforme a pesquisa foi sendo realizada: o Capítulo 1 traz a introdução ao trabalho e em seguida o Capítulo 2 é feita a revisão da literatura, que trata de assuntos de correlação com o estudo e pesquisas anteriores as quais fizeram utilização de métodos ou materiais semelhantes ao desenvolvido.

No Capítulo 3 é feita a apresentação da metodologia aplicada na pesquisa, sendo descritos os materiais usados, normas utilizadas e os parâmetros estudados.

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização química, física dos materiais e mecânicas das misturas solo-cimento e solo-cimento-cinza são abordados no Capítulo 4 bem como sua análise. Os resultados encontrados na pesquisa são comparados com o de outros autores.

No Capítulo 5 são mostradas as conclusões sobre os resultados obtidos, sintetizando os valores encontrados. O capítulo apresenta ainda algumas sugestões para futuras pesquisas envolvendo o material estudado.

CAPÍTULO 2

Revisão da Literatura

2.1 Esgoto

O esgoto é o termo dado às águas, que depois de usadas são eliminadas. Conforme o seu uso e origem pode estar dividido em dois grupos principais: esgotos sanitários e os industriais.

Há presença de substâncias no esgoto nocivas à saúde como: metais pesados, bactérias, vírus, protozoários e helmintos. Além disso, existe a presença de minerais e de matéria orgânica, podendo estes, estar em solução ou suspensão. O despejo destes componentes na superfície e no lençol freático precisa ser minimizado para que não interfira na qualidade da água.

2.1.1 Tipos de Esgotos

Em sua maioria os esgotos sanitários são constituídos por despejos domésticos, uma parte de águas pluviais e outra de água de infiltração. O esgoto doméstico ou domiciliar se origina principalmente das residências, edifícios comerciais, instituições que contenham banheiros, lavanderias, ou qualquer outro dispositivo que utilize a água para finalidade doméstica. É composto essencialmente por urina, fezes, água de banho, papel, restos de comidas, detergentes e sabão.

Os esgotos industriais são os mais variados, sendo produzidos de qualquer uso da água, cuja utilização tenha sido industrial. Suas características dependem do processo industrial empregado. Sendo assim, as indústrias devem ser consideradas separadamente, pois até em processos idênticos seus efluentes podem diferir Jordão; Pessôa (1995).

2.1.2 Tratamento de Esgotos

O tratamento de esgoto consiste desde a captura feita pela rede coletora de água servida, no qual as tubulações recebem os despejos e emitem para as unidades de tratamento, que dependendo, podem ser lançados por condutos livres, e em alguns trechos sendo necessário usar sistema de motor-bomba por condutos forçados (sistema de recalque) até o tratamento em si. No Brasil utilizam-se muito os

caminhões limpa-fossa, que coletam os resíduos de fossas sépticas, sumidouros dentre outros e levam até lagoas de tratamento para que possam ser tratados.

2.1.2.1 ETE

Nas estações de tratamento de esgoto, ETE, o sistema de tratamento está dividido em primário, secundário e em alguns casos usando o sistema terciário.

No primário empregam-se operações do tipo físico, o gradeamento para remoção da matéria em suspensão ou em flutuação. No secundário utilizam-se processos biológicos para eliminar a matéria orgânica. Atualmente, vem sendo utilizado o termo “Tratamento Terciário” ou “Tratamento Avançado”, onde são empregados métodos de eliminação de contaminantes que não tenham sido removidos pelos tratamentos anteriores. A seguir são mostradas as operações de cada etapa do tratamento.

- Primário: Material em suspensão e separado da água por sedimentação, normalmente areia e sólidos grosseiros, a água passa primeiramente por grades e depois por uma caixa de areia em seu percurso em que é feita essa remoção.
- Secundário: Nesta etapa ocorrem reações bioquímicas onde há a remoção da matéria orgânica, também chamado de processo biológico. Usando de reatores do tipo lagoa de estabilização, lodo ativado, filtro biológico dentre outros. Os reatores são compostos por tanques de formas variadas onde estão presentes grandes quantidades de microrganismos aeróbios e anaeróbios, consumidores de matéria orgânica. A sua eficiência chega até 95%, mas em muitos casos ainda há presença de organismos, sendo necessária uma terceira etapa.
- Terciário: Antes do lançamento no corpo receptor, é necessário à desinfecção das águas residuárias antes tratadas nas etapas anteriores. Seja para retirada de microrganismos ou nutrientes, tais como nitrogênio e fósforo. A Figura 2.1 mostra o esquema das etapas de tratamento da água de esgoto. Ao final destas etapas há a geração de subprodutos, material gradeado, areia, espuma e lodo que devem ter um tratamento apropriado,

incluindo etapas como: adensamento, estabilização, condicionamento, desidratação e/ou disposição final.

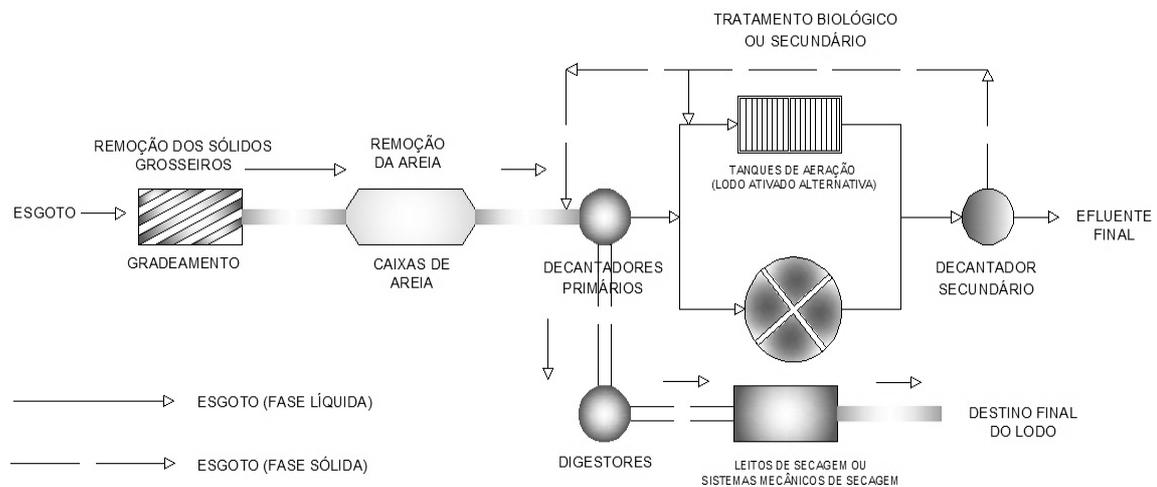


Figura 2.1 – Fluxograma de uma estação de tratamento tradicional.

2.1.2.2 Lagoa de Estabilização

O tratamento é dado pela estabilização da matéria orgânica feito pelas bactérias que produzem ácidos orgânicos em condições anaeróbias ou o CO_2 e a água em condições aeróbias.

2.1.2.3 Lagoa Anaeróbia

O esgoto é depositado em uma lagoa e o processo de tratamento ocorre sem a presença do oxigênio, ocorrendo o fenômeno de digestão ácida; lagoas facultativas onde a remoção da matéria orgânica se dá através do fenômeno de fermentação anaeróbia. A seguir na Figura 2.2 é mostrada a lagoa anaeróbia do km-6 da BR 226 no município de Natal/RN.



Figura 2.2 – Lagoa anaeróbia situada às margens do Km-6 da BR 226, município de Natal/RN.

2.1.2.4 Leito de Secagem

Unidade complementar projetado e construído para receber o lodo sobrenadante. Geralmente seu formato é retangular no qual o processo de secagem ocorre de forma natural por perda de umidade e evaporação dos gases. A Figura 2.3 mostra o leito de secagem da lagoa anaeróbia do km-6 da BR 226.



Figura 2.3 – Leito de secagem do lodo da lagoa anaeróbia do km-6 da BR 226.

2.1.3 Composição química do esgoto

Caso não haja um tratamento correto, o esgoto pode causar prejuízos à saúde pública por meio de transmissão de doenças. Podendo contaminar o solo, os recursos hídricos e as vidas vegetal e animal. O tratamento adequado do mesmo evita os eventuais problemas. O uso de sumidouros tem agravado a contaminação do lençol freático por nitrato. O Ministério da Saúde limita as concentrações de nitrato para água potável 10 mg/L.

O esgoto sanitário tem em sua composição química vários elementos, os quais são mostrados valores típicos em (mg/l) na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Valores de parâmetros de carga orgânica em (mg/l) do esgoto sanitário.

Parâmetros	Condições do esgoto		
	Forte	Médio	Fraco
DBO ₅ (20°C)	300	200	100
O.C.	150	75	30
O.D.	0	0	0
Nitrogênio Total	85	40	20
Nitrogênio Orgânico	35	20	10
Amônia Livre	50	20	10
Nitritos, NO ₂	0,10	0,05	0,0
Nitratos, NO ₃	0,40	0,20	0,10
Fósforo Total	20	10	5,0
Orgânico	7	4	2,0
Inorgânico	13	6	3,0

Fonte: Jordão (1995).

2.2 Lodo de Esgoto

O lodo é a fase sólida do esgoto. Em sua composição química pode ser encontrada várias substâncias, dependendo de sua origem, tais como metais pesados, graxas, ácidos, minerais, dentre outras.

Os diversos tipos de tratamento de esgoto produzem diferentes tipos de lodo, com características próprias conforme é mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Características dos lodos de ETE.

Tipo de resíduo	Características
Resíduos retidos nas grades	Sólidos grosseiros, pedaços de madeira, papel.
Sedimentos de caixa de areia	Material mineral: solo, partículas orgânicas ligadas aos minerais.
Escuma	Material sobrenadante de decantadores ou de alguns reatores, ricos em óleo e graxas. Não deve ser misturado ao lodo (uso em agricultura).
Lodo primário	Lodo obtido por sedimentação do esgoto no decantador primário. Normalmente é cinza e tem odor ofensivo. Pode ser digerido facilmente por via anaeróbia.
Lodo secundário (processo lodos ativados)	Aparência floculada e tons marrons; coloração mais escura indica condições anaeróbias do meio. Tende à decomposição anaeróbia devido ao excesso de matéria orgânica. Pode ser digerido sozinho ou misturado com lodo primário.
Lodo digerido aeróbio (ativado e primário)	Apresenta cor marrom escura e aparência floculada, odor ofensivo. É facilmente drenado.
Lodo digerido anaeróbio (ativado e primário)	Apresenta cor marrom escura ou preta. Se for bem digerido não apresenta odor ofensivo. Também é fácil de ser drenado.

Fonte: Fernandes (1999).

Estudos de Ferreira *et al.* (1999), apontam que de 1% a 2% apenas é o volume de lodo produzido por uma estação de tratamento de esgoto em relação ao volume total. Na Tabela 2.3 pode-se observar a composição química.

Tabela 2.3 – Composição química típica do lodo de esgoto

Características	Lodo primário cru		Lodo digerido	
	Intervalo	Média	Intervalo	Média
Sólidos totais – ST (%)	2,0 – 8,0	5,0	6,0 – 12,0	10,0
Sólidos voláteis (% ST)	60 – 80	65	30 – 60	40
Proteínas (% ST)	20 – 30	25	15 – 20	18
Nitrogênio (% ST)	1,5 – 6,0	4,0	1,6 – 6,0	4,0
Fósforo (% ST)	0,8 – 3,0	2,0	1,5 – 4,0	2,5
Potássio (% ST)	0,0 – 1,0	0,4	0,0 – 3,0	1,0
pH	5,0 – 8,0	6,0	6,5 – 7,5	7,0
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /l)	500 – 1500	600	2500 - 3500	3000
Ácidos orgânicos (mg/l)	200 – 2000	500	100 – 600	200

Fonte: Ferreira *et al.* (1999)

O lodo por sua composição biológica conter grande presença de microrganismos patogênicos e na constituição química substâncias tóxicas, é considerado um problema para administração das cidades, pois uma má condução deste resíduo pode ocasionar vários problemas à saúde e ao meio ambiente.

O tratamento correto do lodo faz com que haja uma diminuição de micro organismos e substâncias tóxicas, amenizando o impacto ambiental.

A disposição final é um grande problema para os administradores da saúde pública, uma vez que estudos de Andreoli & Fernandes (1999) apontam que sua disposição final pode ficar em até 60% dos custos de operacionalização de uma unidade de tratamento.

2.2.1 Caracterização físico-química do lodo *in natura*

O tratamento e a disposição adequada passam pelo conhecimento das características físico-químicas dos lodos. A Tabela 2.4 mostra a caracterização físico-química dos lodos provenientes de descartes de caminhões limpa-fossa das

Cidades de Natal/RN, Florianópolis/SC e Joinville/SC. Os resíduos são originados de unidades de tanque séptico, sumidouro, fossa absorvente, caixa de gordura entre outras.

Tabela 2.4 – Caracterização de lodos Natal/RN, Florianópolis/SC e Joinville/SC, respectivamente.

Parâmetros	Unidade	Média		
		(1)	(2)	(3)
Temperatura	°C	30,0	-	24,0
pH	-	6,9	6,7	7,1
Cor	uH	4813	-	-
Turbidez	uT	7677	-	-
Condutividade	µS/cm	1550	-	-
Sólidos totais	mg/L	12880	9550	1631
Sólidos totais fixos	mg/L	2824	-	984
Sólidos totais Voláteis	mg/L	5436	6172	736
Sólidos suspensos	mg/L	7091	6896	492
Sólidos suspensos fixos	mg/L	1575	-	-
Sólidos suspensos Voláteis	mg/L	3471	5019	-
Sólidos dissolvidos		5789	-	-
Sólidos Dissolvidos fixos		1249	-	-
Sólidos Dissolvidos voláteis		1966	-	-
Sólidos sedimentáveis		266	-	184
Cloreto	mg/L	254	-	-
Acidez	mg/L	205	-	-
Alcalinade total	mg/L	498	994	1982
Sulfito	mg/L	-	-	726,02

Continuação Tabela 2.4 – Caracterização de lodos Natal/RN, Florianópolis/SC e Joinville/SC, respectivamente.

Parâmetros	Umidade	Média		
		(1)	(2)	(3)
Sulfeto	mg/L	-	-	16,78
Fósforo	mg P/L	18	45	111
Nitrogênio total	mg N/L	117	-	770
Nitrogênio orgânico	mg N/L	35	-	1,2
Nitrogênio amoniacal	mg N/L	80	116	769
Nitrito	mg N/L	0,00	-	0,02
Nitrato	mg N/L	1,9	-	1,8
Óleos e graxas	mg/L	861	1588	970
DBO	mg/L	2434	2808	2829
DQO	mg/L	6893	10383	7911
Coliformes termotolerantes	UFC / 100 ml	3,6 X 10 ⁷	-	-
Helmintos	Ovos/L	224,5	-	-

Fonte: (1) Meneses (2001); (2) Belli Filho *et al.* (2004); (3) Rocha & Sant Anna (2005).

Consultando a bibliografia presente sobre umidade do lodo de ETE, foi encontrado no trabalho de Okuno *et al.*, (1997) *apud* Geyer (2001) que as umidades dos lodos encontrados nas ETE's variavam de 98% a 99,5%.

Nos lodos da estação de tratamento do seu estudo ETE IAPI (RS), coletadas no leito de secagem as umidades variaram entre 25% e 35%, cita Geyer (2001).

2.2.2 Produção e gerenciamento do lodo

Gerenciamento é uma atividade de grande complexidade e desprende alto custo para isto. Sendo mal executada, pode ocasionar em impactos ambientais e riscos sanitários (Andreoli *et al.*, 2001).

No Brasil, de uma maneira geral, os resíduos sólidos de esgotos são captados por caminhões limpa-fossa e seu destino final ocorre sem nenhum controle nos limites das cidades ou nas redes coletoras de águas pluviais, gerando grandes impactos nos cursos d'água (Cassini *et al.*, 2003).

O volume de lodo produzido por um sistema de tratamento depende em si da vazão e das características do lodo tratado, tendo o tipo de tratamento e operação do sistema grande influência nessa produção. Na Tabela 2.5 são apresentadas produção em volume de lodo de várias formas de tratamento.

Tabela 2.5 – Volume de lodo produzido nos diversos tipos de tratamento.

Tipo de Tratamento	Volume do lodo produzido (m³/hab./ano)
Lagoa anaeróbia – lagoa facultativa	0,01 a 0,04
Lagoa aerada facultativa	0,03 a 0,08
Lodos ativados convencionais	1,1 a 1,5
Filtro biológico (baixa carga)	0,4 a 0,6
Filtro biológico (alta carga)	1,1 a 1,5
Reator anaeróbio de manta de lodo	0,07 a 0,1
Fossa séptica – filtro anaeróbio	0,07 a 0,01

Fonte: Ferreira *et al.* (1999)

2.2.3 Contaminantes do lodo

Algumas substâncias contidas no lodo podem contaminar o meio ambiente e trazer doenças para o ser humano e os animais. São encontrados presentes no lodo de esgoto substâncias e organismos patogênicos tais como: metais pesados, vírus, bactérias, fungos e vermes.

2.2.3.1 Os Metais pesados

Segundo Andreoli *et al.* (2001) os metais pesados são prejudiciais à saúde dos homens e comprometem o equilíbrio do meio ambiente, pois os organismos em contato com eles têm suas atividades prejudicadas. Este prejuízo vai depender da concentração e do tempo de exposição em o que os seres humanos ou animais são expostos aos metais.

Os metais que estão neste contexto tem sua densidade maior que 5g/cm³. São classificados nesta definição e encontrados no lodo: Prata (Ag), Arsênio (As), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Antimônio (Sb), Selênio (Se) e Zinco (Zn).

De acordo com Werther & Ogada *apud* Santos (2003), podem ser encontrados no lodo na forma de hidróxidos, carbonatos, fosfatos, silicatos e sulfatos. A única maneira de amenizar sua presença é não lançar nos sistemas de coleta de esgotos.

2.2.3.2 Os Microrganismos

Os grupos patogênicos presentes no lodo são: bactérias, vírus, protozoários, fungos e helmintos. Sua origem pode ser animal ou humana.

O contato direto com o lodo sem um tratamento prévio e não havendo medidas preventivas como uso de equipamentos de proteção individual: botas apropriadas, luvas, máscara e roupas podem causar contaminação no homem e em animais.

O problema sanitário não é o único quando se trata de utilização do resíduo *in natura*. O seu uso adicionado em materiais de construção pode ocasionar degradação microbiológica devido aos microrganismos presentes. Podemos citar alguns exemplos da ação dos microrganismos sobre as infraestruturas e estradas: bactérias consumidoras de hidrocarbonetos deterioram/degradam o asfalto das estradas e pistas de aterrissagem, um exemplo é a biodeterioração dos concretos e biocorrosão dos metais e armaduras.

De acordo com Pendrys (1989) *apud* Medeiros (2006) seu estudo mostra existência de um grupo de bactérias e fungos com habilidade para degradar o hidrocarboneto presente no petróleo.

Segundo Atlas (1981) *apud* Medeiros (2006) o asfalto é fonte de carbono e energia para as bactérias. A degradação microbiológica do petróleo depende de vários fatores tais como: a comunidade biológica, fatores ambientais e a natureza do hidrocarboneto que podem influenciar na degradação.

2.2.4 Processo térmico de higienização do lodo

O grupo dos helmintos são os que apresentam maiores resistências de vida presentes no lodo de esgoto, seus ovos podem continuar viáveis até por sete anos.

O processo térmico de tratamento é uma saída para remoção de helmintos, pois eles são resistentes à desinfecção e dessecação química do lodo. É importante no tratamento conhecer a relação temperatura e tempo de exposição do lodo.

Em seus estudos, Andreoli *et al.* (2000) conseguiram atingir níveis satisfatórios de redução dos ovos de helmintos a uma exposição do lodo em estufa durante 5 minutos e temperatura de 80°C. Em outra pesquisa, Lima *et al.* (2005) obtiveram a conclusão que ao expor o lodo durante 10 minutos e a uma temperatura de 70°C há uma eliminação quase que total dos ovos.

2.3 Disposição final dos lodos de esgotos

Segundo Gonçalves *et al.* (2001) o destino final adequado do lodo corrobora para o sucesso do sistema de esgotamento sanitário. No entanto no Brasil pouco se tem contribuições para o manejo adequado do resíduo.

O lodo pode ser destinado adequadamente de inúmeras formas, desde a simples estocagem como rejeito em aterros até sua incorporação na geração de novos produtos. A escolha dentre as alternativas de destino deve ser baseada nas peculiaridades de cada sistema, sob o ponto de vista tecnológico, econômico e ambiental.

A Tabela 2.6, mostrada a seguir, destacam-se algumas das tecnologias empregadas na disposição final do lodo de esgoto, mostrando as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

Tabela 2.6 – Vantagens e desvantagens das alternativas de disposição do lodo.

Alternativa de disposição	Vantagens	Desvantagens
Descarga oceânica	Baixo custo	Poluição das águas, flora e fauna oceânica.
Incineração	Redução drástica de volume	Custos elevados
		Disposição das cinzas
		Poluição atmosférica
		Necessidade de grandes áreas
	Esterilização	Localização próxima a centros urbanos
		Características especiais do solo
		Isolamento ambiental
		Produção de gases e percolato
	Dificuldade de reintegração da área após desativação	
“Landfarming”	Degradação microbiana de baixo custo	Acúmulo de metais pesados e elementos de difícil decomposição no solo
	Disposição de grandes volumes por unidade de área	Possibilidade de contaminação do lençol freático
		Liberação de odores e atração de vetores
	Dificuldade de reintegração da área após desativação	

Continuação Tabela 2.6 – Vantagens e desvantagens das alternativas de disposição do lodo.

Alternativa de disposição	Vantagens	Desvantagens
Recuperação de áreas degradadas	Taxas elevadas de aplicação	Odores
	Resultados positivos sobre a reconstituição do solo e flora	Limitações de composição e uso
	Grande disponibilidade de áreas	Contaminação do lençol freático, fauna e flora
	Efeitos positivos sobre o solo	Limitações referentes à composição e taxa de aplicação Contaminação do solo com metais
Reciclagem agrícola	Solução em longo prazo	Contaminação de alimentos como elementos tóxicos e organismos patogênicos
	Potencial como fertilizante	
	Respostas positivas das culturas ao uso	Odores

Fonte: Andreoli *et al.* (2001).

O lodo pode ser disposto de várias formas. Na Tabela 2.7 é mostrada a avaliação dos custos das diferentes disposições do resíduo.

Tabela 2.7 – Comparação dos custos de diferentes alternativas de disposição final do lodo de esgoto.

Alternativa de disposição final	Custo (U\$/t)	Custo Médio (U\$ / t)
Oceânica	12 a 50	31
Aterros sanitários	20 a 60	40
Incineração	55 a 250	152,5
Reciclagem agrícola	20 a 125	72,5

Fonte: Adaptado de Carvalho & Barral (1981).

Baseada na Tabela 2.7, de Carvalho & Barral (1981). A Figura 2.4 mostra os percentuais das várias formas de lançamento do lodo em relação ao menor custo

médio, que é o lançamento oceânico. Podemos ver a seguir que o custo com incineração é em torno de cinco vezes maior que o de referência.

Talvez o motivo pelo qual o Brasil opte preferencialmente pelo uso de aterros sanitários seja devido a questões geográficas, com uma vasta extensão territorial, faz o uso como a alternativa principal de disposição final do lodo. Esta forma de disposição contribui para problemas ambientais, aliada a falta de boas práticas de reciclagem dos resíduos que ficam expostos no meio ambiente. O Japão, por ser um arquipélago de 6.852 ilhas com uma extensão territorial de 377.873 km² sendo quase 23 vezes menor que o Brasil usa a incineração como destino final do lodo, hoje incinera 80% de sua produção de lodo.

Mas a disposição final não pode ser avaliada por um ponto de vista isolado. A viabilidade para implantação do sistema, os custos, riscos ambientais devem ser tomados como parâmetros de estudo para a escolha do meio de destinação final.

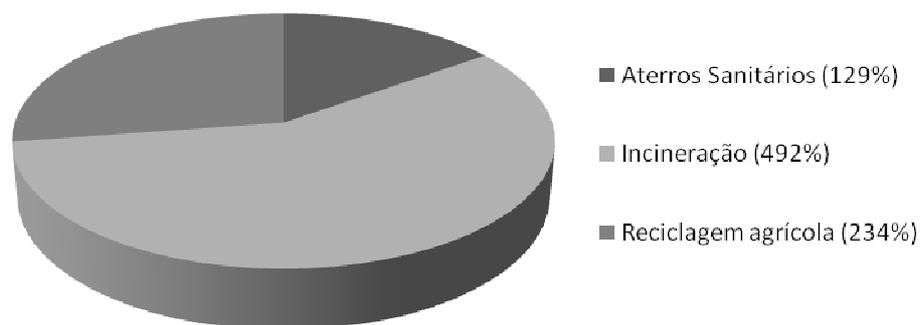


Figura 2.4 – Percentual do custo médio das formas de disposição final de lodo de esgoto em relação ao custo médio de lançamento oceânico.

Segundo Santos (2003) a classificação da disposição do lodo varia com o uso. Podendo ser vista de duas formas:

- O descarte: todas as formas de disposição que não aproveitam o resíduo.
- Uso benéfico: formas de utilização do resíduo no solo ou na indústria como fator agregador.

Geyer (2001) faz menção sobre a utilização do lodo nos EUA e no Japão, usando em diferentes alternativas de destino. Na 11ª Conferência Americano-Japonesa sobre a Tecnologia de Tratamento de Esgotos Sanitários o pesquisador referencia o evento tendo um caráter impactante quanto ao incentivo de disposição final do lodo, reciclagem e a aplicação dele como insumo e na fabricação de produtos. Existem três áreas básicas de referência de pesquisa para aplicação do lodo dada pela “ACE PLAN Japonês”, Areawide Sewage Sludge Treatment and Disposal Project: (A) agricultura, (C) construção e (E) energia.

No Brasil, a maioria do lodo (cerca de 80%) é descartado em aterros sanitários sem que haja um uso benéfico. Uma parcela pequena de 5% é usada na agricultura.

Na Tabela 2.8 é mostrado um comparativo dos principais meios de disposição adequado dos lodos nos países desenvolvidos e no Brasil.

Tabela 2.8 – Principais meios de disposição do lodo nos países.

Países	Métodos de disposição (como % total produzido)			
	Aterros (%)	Agricultura (%)	Incineração (%)	Outros (%)
França (1)	50	50	0	0
Alemanha (1)	25	63	12	0
Itália (1)	34	55	11	0
Espanha (1)	10	50	10	30
Portugal (1)	80	13	0	7
EUA (2)	30	20	30	20
Japão (2)	6	14	80	0
Brasil (2)	80	5	0	15

Fonte: (1) Chang *et al.* (2001) (2) Geyer (2001) *apud* Duarte (2008).

De acordo com Mata Alvarez *et al. apud* Carneiro (2005), países desenvolvidos tem buscado a diminuição de aterros sanitários, uma das formas seria

o uso da incineração. Países como a Dinamarca, Alemanha, Holanda, Suécia, e Suíça vêm usando este recurso.

Os riscos da poluição do solo e das águas são amenizados, mas por outro lado o uso da incineração causa poluição atmosférica, sendo uma preocupação com as cinzas volantes geradas na incineração.

2.3.1 Incineração do lodo

A incineração é o processo o qual utiliza a queima, como tratamento do lodo, reduzindo bastante o volume inicial e proporcionando melhores condições de disposição (Geyer, 2001).

Saito (1994) *apud* Geyer (2001) cita que a incineração é o processo mais seguro do ponto de vista do tratamento sanitário do lodo ou lixo. Uma vez que são reduzidas à cinzas, os materiais presentes, que são em maioria decomponíveis, sendo inertes se comparado ao seu estado natural.

O processo de tratamento por incineração do lodo é mais simples do que disposição do lodo *in natura* e vem ganhando adesão em vários países. A disposição das cinzas em materiais de construção está presente em vários temas de pesquisa.

O forno mais utilizado para incineração de lodo é o de múltiplos estágios, devido sua alta capacidade de incinerar, eficiência e controle de emissão dos gases (ACE PLAN, 1990).

2.3.1.1 Composição química do lodo incinerado

Não há procedimentos que norteiem a queima de lodo por incineração. Segundo Metcalf e Edy (1992) nos processos de incineração do lodo são usadas temperaturas acima de 550°C, podendo chegar até 950°C, não existindo uma grande variação das substâncias encontradas nos resíduos obtidos.

A Tabela 2.9 mostra os componentes químicos encontrados no lodo incinerado a 550°C na ETE de pinheiros de São Paulo, na ETE IAPI de Porto Alegre, na ETE de Tsukuda no Japão, na ETE Shiga no Japão e na ETE Hannover na Alemanha.

Tabela 2.9 – Composição química de lodos incinerados a 550°C.

Composição química	ETE de Pinheiros (1)	ETE de IAPI (2)	ETE de Tsukuda (3)	ETE de Shiga (4)	ETE de Hannover (5)
SiO ₂	51,74	55,20	51,90	46,60	36,20
Al ₂ O ₃	26,58	13,00	15,60	26,0	14,20
Fe ₂ O ₃	6,51	3,00	7,30	5,00	5,60
CaO	4,57	0,28	6,20	8,60	10,00
P ₂ O ₅	1,69	-	9,20	2,39	1,50
MgO	1,76	0,90	2,30	2,10	1,50
Na ₂ O	0,37	-	0,40	1,20	0,70
K ₂ O	1,33	-	0,60	0,70	1,20
Cr	0,21	0,01	0,30	0,09	0,45
Ni	0,04	-	-	-	-
Cu	0,08	-	-	-	-
Zn	-	-	-	0,20	-
As	-	-	-	0,07	-
Cd	-	-	-	-	-
Pb	0,05	-	0,01	-	0,02
Hg	-	-	-	-	-
Se	-	-	-	-	-
Ba	0,01	-	-	-	-
MnO	0,24	-	-	-	-
S – SO ₃	1,92	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Geyer *et al.* (2001).

A preocupação em dar um destino correto a estas cinzas após a incineração vem sendo uma temática bastante estudada em várias pesquisas, um dos potenciais é o uso como material pozolânico na construção civil, pois muitas cinzas, inclusive

as de lodo e outras tais como cinzas de carvão mineral, de casca de arroz, resíduos sólidos urbanos são estudadas na incorporação de vários materiais como concretos, concretos asfálticos, cimentos, argamassas, tijolos, dentre outros aproveitamentos e incorporações.

2.3.1.2 Caracterização do lodo incinerado

2.3.1.2.1 Volatilidade do lodo incinerado

Geyer (2001) cita em seu estudo que o lodo da ETE de IAPI/RS incinerado a uma temperatura de 550°C sendo o material volatilizado após a queima, restando apenas 9,98g. Em outra pesquisa Geyer *et al.* (1995) incineraram lodo parcialmente secos, obtidos após a secagem em estufa. O resultado pode ser visto na Tabela 2.10 a seguir.

Tabela 2.10 – Resíduos obtidos após incineração a 550°C de lodo seco em estufa.

Amostras	(1)	(2)
Peso incinerado (g)	44,23	35,18
Resíduo gerado (g)	14,30	11,83
Percentual volatilizado (%)	67,67	66,36
Percentual gerado (%)	32,33	33,64

Fonte: Adaptado de Geyer (2001).

2.3.1.3 Classificação geotécnica da Cinza de lodo ETE IAPI/RS

Em estudo realizado com a cinza da ETE de IAPI/RS incinerada a uma temperatura de 550°C os autores Geyer, Dal Molin e Consoli (1998) obtiveram a distribuição granulométrica do resíduo, os coeficientes de curvatura e uniformidade, e os limites de Atterberg. Os resultados podem ser vistos respectivamente na Figura 2.5 e na Tabela 2.11 a seguir.

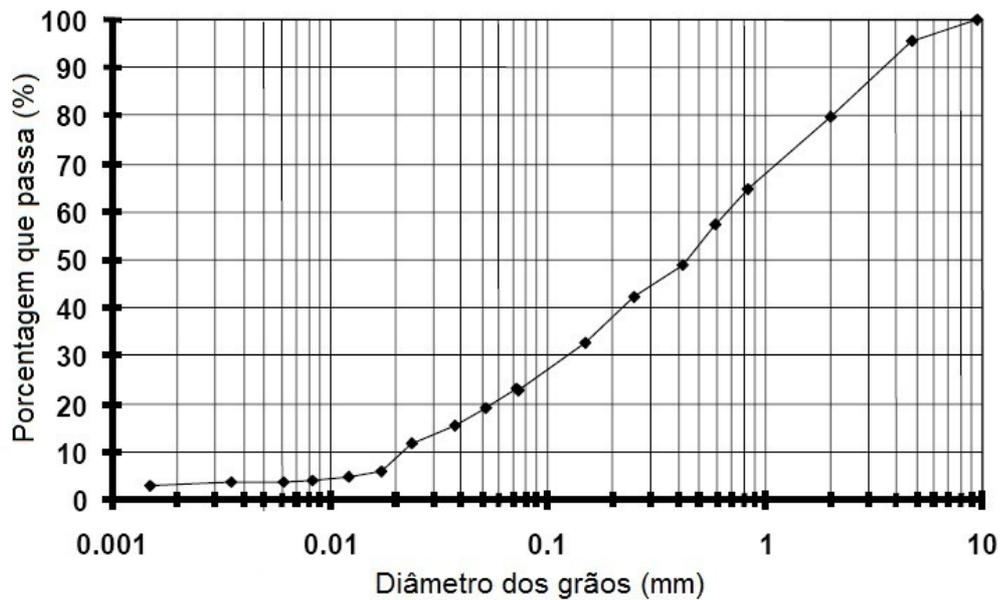


Figura 2.5 – Distribuição granulométrica da cinza de lodo ETE IAPI/RS.

Fonte: Adaptado de Geyer (2001).

Tabela 2.11 – Parâmetros da cinza de lodo da ETE IAPI/RS.

Parâmetros	Valores
Limites de Atterberg	Não plástico
Coeficiente de curvatura "Cc"	1,30
Coeficiente de uniformidade "Cu"	32,00

Fonte: Geyer (2001).

De acordo com os valores obtidos nos ensaios acima, a cinza foi classificada como SM, areia siltosa, conforme a classificação da USCS.

Os autores ainda fizeram o estudo de compactação da cinza na energia normal, e o resultado pode ser visto na Figura 2.6 a seguir. O Valor de massa específica máxima seca foi de 14,40 KN/m³ e umidade ótima de 19,6%.

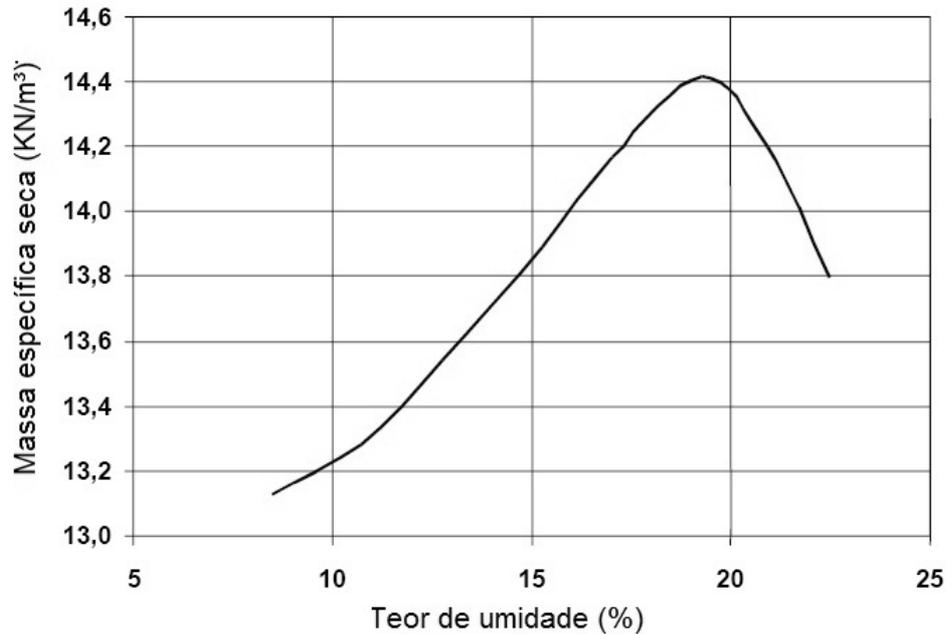


Figura 2.6 – Curva de compactação para a cinza, massa específica seca x umidade, adaptado de Geyer (2001).

2.3.1.4 Caracterização química do lodo incinerado

2.3.1.4.1 Difratomia de raios X

No programa de doutoramento em engenharia civil da UFRGS, os pesquisadores Geyer *et al.* (1995) realizaram ensaios de difratometria de raios X em amostra de cinza de lodo incinerado a 550°C da ETE de IAPI, e foram identificados alguns compostos, tais como apresentados na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Minerais presentes na amostra de lodo da ETE IAPI, adaptado de Geyer (2001).

Mineral	Forma	Quantidade
SiO ₂	quartzo	maior
CaSO ₄	Anidrita (gesso)	menor
Mg ₃ Si ₄ O ₁₀	Talco	pouca

2.3.1.4.2 Fluorescência de raios X

Geyer (2001) em seu estudo com as cinzas, tanto com a da queima a 550°C como na de 800°C obteve teores elevados de silício, ferro, cálcio e alumínio. A presença destes pode indicar uma eventual reatividade do material como agente cimentante ou pozolânico.

Ao analisar alguns materiais utilizados como aditivos minerais em concretos e argamassas, os autores citados por Geyer (2001) na Tabela 2.13 mostra a análise química de típicos materiais pozolânicos.

Tabela 2.13 – Análise química de típicos materiais pozolânicos, naturais e subprodutos.

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

Fonte: Adaptado de Geyer (2001).

2.4 Resíduos sólidos

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), define que resíduos sólidos como: resíduos nos estados sólidos e semissólidos resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água.

A classificação dos resíduos está ligada a seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, a fim de dar um manuseio e destino adequado. A sua periculosidade está ligada diretamente às suas propriedades físicas, químicas e/ou infectocontagiosas. Assim NBR 10.004 tem sua classificação geral dos resíduos em três categorias abaixo mostradas:

- Resíduos Classe I – Perigosos: São os que apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: Inflamabilidade, Corrosividade, Reatividade, Toxicidade e/ou Patogenicidade.
- Resíduos Classe II – Não Perigosos: Este está dividido em duas subcategorias mostradas a seguir:
- Resíduos Classe II A – Não Inertes: São aqueles que não se enquadram na classificação de Resíduos Classe I - Perigosos ou de Resíduos Classe II B – Inertes. Estes resíduos têm características, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos Classe II B – Inertes: Quaisquer resíduos quando colocados em contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004c), não tiverem seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Existe legislação ambiental no qual avalia a reciclagem de resíduos em sua incorporação a um produto, analisando o impacto no meio ambiente. A preocupação é com a contaminação por lixiviação, diluição ou dessorção em meio líquido de elementos como metais pesados ou substâncias tóxicas.

O lodo de esgoto está inserido geralmente como resíduo de “classe I” – perigoso, pois na maioria dos casos de estudo de lixiviação tem características de

patogenicidade devido à presença de microrganismos infectocontagiosos, mas é preciso fazer análises químicas quantitativas para conclusão de sua classe comparando com os valores da (NBR 10.004 ABNT, 2004).

2.5 Estabilização de solos para uso em pavimentos

A estabilização é um método utilizado a fim de aumentar a resistência e tornar mais durável o material para que possa resistir aos esforços do tráfego e os efeitos das intempéries (Vogt, 1971).

O engenheiro geotécnico muitas vezes precisa lançar mão de estratégias para solucionar problemas com relação às especificações do solo para pavimentos rodoviários, muitas vezes o material encontrado na região não tem características adequadas, para contornar esta situação podem-se usar várias ações, Medina (1987) menciona as seguintes estratégias:

- Evitar ou contornar o terreno inadequado;
- Remover o solo inadequado e substituí-lo por outro com melhores propriedades;
- Fazer um projeto compatível com o solo ruim;
- Melhorar ou estabilizar o solo existente.

Estabilizar um solo pode ser entendido como alterar suas propriedades a fim de melhorar seu desempenho mecânico e de engenharia, usando para obter esta mudança um processo artificial que pode ser: químico, físico ou físico-químico. O resultado final é um material estável onde mesmo exposto a cargas externas e situações de mudanças de climas é capaz de resistir (Vizcarra, 2010).

Algumas propriedades são almejadas após a estabilização. Pode-se citar:

- Aumento da resistência do solo e menor sensibilidade à umidade;
- Diminuição da deformabilidade;
- Diminuição da permeabilidade.

2.5.1 Estabilização mecânica

Segundo Soliz (2007) estabilizar mecanicamente um solo é fazer uso de uma simples compactação até um rearranjo das partículas do mesmo, ou seja, estabilizando granulometricamente.

Santos *et al.* (1995) relatam que a estabilização mecânica faz uso do processo de compactação do solo, no qual há uma redução da porosidade, reduzindo o volume de vazios que tem relação com o ganho de resistência.

Em campo na construção do pavimento a densificação do solo é feita camada por camada, quer seja ou não usado outro processo. Sendo realizada através do uso que equipamentos mecânicos como: rolos compactadores, caminhões ou até mesmo compactadores manuais (Pinto e Preussler, 2002).

A correção granulométrica usando a estabilização mecânica traz melhoria ao solo através da adição de um ou mais solos com a finalidade de obter um novo material com propriedades aceitáveis para uso em pavimentação (Santos *et al.*, 1995).

Na prática se faz de um estudo de estabilização granulométrica com uso de um ou mais solo misturando ao solo original e fazendo a compactação da mistura com a finalidade de obter um material mais compacto e menos deformável.

2.5.2 Estabilização física

Segundo Pinto (2008) as propriedades do solo são modificadas quanto a sua textura. Algumas técnicas são conhecidas e bastante aplicadas como a descrita no item anterior a estabilização por correção granulométrica ou com adição de fibras: (metálicas, minerais, vegetais ou sintéticas).

A estabilização granulométrica é feita quando se quer alterar as propriedades do solo por atingir um objetivo específico, alterando a distribuição das partículas do mesmo.

2.5.3 Estabilização química

A estabilização química pode ser definida como a adição de uma ou mais substâncias químicas ao solo, a fim de gerar uma mudança no seu comportamento quanto ao ganho de resistência e estabilidade quanto às intempéries, tais mudanças podem influenciar também na permeabilidade e deformabilidade atingindo o objetivo previsto.

Um exemplo é o uso da cal e cimento para estabilizar solos finos, argilosos com teores elevados de matéria orgânica, ou até mesmo solos de graduação

maiores com uso do aglomerante asfáltico, cimento asfáltico de petróleo-CAP, dando ligação entre as partículas.

Na estabilização química ocorrem reações químicas entre o aditivo e os minerais do solo (fração coloidal), e ou com a água presente nos poros da massa do produto. As reações solo-cimento são caracterizadas por um processo físico-químico o qual os cátions Ca^{2+} são liberados na hidratação do aglomerante reagindo com os argilominerais modificando o pH da solução eletrolítica. A cimentação que se forma posterior à reação dá-se o nome de reação pozolânica que acresce rigidez a mistura (Medina, 1987).

Em uma matriz descontínua o agente estabilizador não preenche totalmente os poros, podendo então ocorrer três modos de ações (Vizcarra, 2010):

- Modificação das características das superfícies das partículas;
- Vedação inerte dos poros;
- Interconexão entre as partículas do solo (solda por pontos).

A estabilização química mais utilizada é de solo-cimento, na qual o cimento propicia um ganho na resistência ao solo, fazendo uso das reações pozolânicas e sílica ativa presente no solo. Um dos motivos pela preferência por cimento à cal, é que a resistência é atingida em idades inferiores a cal; outro pode ser pelo cimento ter afinidade em estabilizar uma variedade de solos.

2.5.3.1 Solo cimento

Vários tipos de cimentos podem ser usados para estabilização de solos, no qual quase todos os tipos de solos podem ser estabilizados. Algumas dificuldades são apresentadas quando se trata de argilas muito plásticas e orgânicas, com um percentual maior que 2% de matéria orgânica, o qual exige uma quantidade maior de cimento para se conseguir uma mudança esperada nas propriedades mecânicas (Sandroni e Cosoli, 2010).

A estabilização utilizando solo-cimento é uma mistura homogênea contendo solo, cimento e água em proporções pré-definidas que, após compactação, é colocada em cura, resultando em um produto com propriedades mínimas exigidas de resistência mecânica e durabilidade (ABCP, 1986).

O uso de cimentos em pavimentos no Brasil teve início em 1940, influenciado por experiências de sucesso nos Estados Unidos, onde o solo-cimento na pavimentação foi bastante utilizado (BNH, 1983). Após esta época, o uso de solo junto com cimento para fim de estabilização vem sendo estudada em outros países e no Brasil, onde podemos citar algumas referências como Ingles e Metcalf (1973), Lima *et al.* (1993) e Trindade *et al.* (2003).

A faixa viável de uso do aglomerante hidráulico para estabilização de solos para fins rodoviários fica entre 5% e 9% de cimento em relação à massa total. Acima destes percentuais, os custos ficam bastante elevados, tornando a estabilização muitas vezes inviável do ponto de vista econômico (Pavimentação asfáltica, Liedi Bariami Bernucci *et al.*, p.363).

A ABNT define cimento Portland como aglomerante hidráulico obtido a partir da moagem do clínquer Portland, no qual durante a moagem, adiciona-se gesso (sulfato de cálcio) com a finalidade de regular o tempo de pega. Durante o procedimento de moagem podem ser adicionados também materiais pozolânicos (cinza de alto forno, materiais carbonáticos).

Os principais compostos químicos anidros presentes no cimento que conferem suas propriedades físicas, são mostrados abaixo:

- Silicato Tri cálcico, ou alita $(3CaO.SiO_2) \rightarrow C_3S$
- Silicato Di cálcico, ou belita $(2CaO.SiO_2) \rightarrow C_2S$
- Aluminato Tri cálcico $(3CaO.Al_2O_3) \rightarrow C_3A$
- Ferroaluminato Tetra cálcico, ou ferrita $(4CaO.Al_2O_3.FeO_2) \rightarrow C_4AF$

Mehta e Monteiro (2000) descrevem em faixa percentual os componentes básicos do cimento Portland, como se observa na Tabela 2.14:

Tabela 2.14 – Percentual dos componentes presentes no cimento Portland.

Componente	Percentual (%)
3 CaO.SiO ₂	35 a 65
2 CaO.SiO ₂	10 a 40
3 CaO.Al ₂ O ₃	0 a 15

Continuação Tabela 2.14 – Percentual dos componentes presentes no cimento Portland.

Componente	Percentual (%)
4 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	5 a 15

Fonte Mehta e Monteiro (2000).

As primeiras reações acontecem quando a água entra em contato com cimento Portland, podendo ser descritas a seguir:

- $2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$
- $2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$
- $3CaO.Al_2O_3 + 12H_2O + Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.Ca(OH)_2.12H_2O$
- $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O + 10H_2O + 2Ca(OH)_2 \rightarrow 6CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3.12H_2O$

(i) na primeira reação, o silicato tri cálcico (C3S) é responsável pela resistência inicial nos primeiros dias, proporciona um alto desprendimento de calor, liberando cerca de 40% em massa de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂)

(ii) O silicato dicálcico (C2S) proporciona resistência em idades mais avançadas, desprendendo baixo calor e produz cerca de 18% em massa do hidróxido de cálcio.

(iii) O aluminato tricálcico (C3A) reage inicialmente, logo nos primeiros minutos da hidratação liberando grande calor, propicia pouca resistência e é responsável por grande retração.

(iv) O ferroaluminato tetra cálcico (C4AF) tem reação bastante lenta, e desenvolve uma parcela pequena na resistência, mas é importante quanto à resistência ao ataque por sulfatos.

Nos solos finos, a parcela da argila pode ajudar a estabilizar pois, quando em solução de pH alto reagindo junto com a cal livre presente no cimento pode formar CSH adicional (cinza pozolânica), (Vizcarra, 2010).

Quase como regra, o consumo de cimento cresce com o aumento da parcela de finos presentes no solo, assim, para estabilizar um solo argiloso seria necessário

uma maior quantidade de cimento do que seria para a estabilização de uma areia bem graduada. A exceção ocorre quando se trata de uma areia uniforme necessitando de mais cimento do que solos arenosos com a presença de silte e argila.

Medina (1987) separa a estabilização por cimento nas seguintes classes abaixo:

- Solo-cimento: É a mistura íntima de solo-cimento ao qual é adicionado água em proporções pré-definidas por ensaio de compactação com a energia necessária para atingir um maior grau de compactação e consequentemente as propriedades mecânicas desejadas. Este material passa por cura inicial cujo processo finaliza com o seu endurecimento. Mais tarde esse produto passa por ensaios de compressão simples para avaliar sua resistência e durabilidade, podendo ser usado em base ou sub-base;
- Solo modificado ou melhorado: É a mistura de solo-cimento e água com baixo teor de cimento, não devendo ultrapassar os 5% em relação à massa do solo, referenciado pela alteração nos índices físicos e/ou capacidade de suporte do solo. Podendo ser utilizado em base, sub-base ou subleito;
- Solo-cimento plástico: Usa uma maior quantidade de água durante a mistura que a do solo melhorado, devido ao seu uso necessitar de uma consistência de argamassa em vez de “farofa” que o caso anterior. Utilizado para revestir valas, canais e taludes.

A adição de cimento ao solo é uma técnica bastante difundida e usada em obras de engenharia rodoviária. A estabilização em pavimentos ocorre nas camadas subjacente à camada de rolamento, base, sub-base e subleito.

2.5.3.1.1 Adições pozolanas ao cimento e concreto

O termo pozolana vem do italiano pozzolana ou pozzuolana, região da Itália (pozzuoli) próxima a Vesúvio, onde foram encontradas as “cinzas pozolânicas”, cinzas vulcânicas.

De acordo com Almeida (1990) *apud* Geyer (2001), a definição clara de materiais pozolânicos e/ou adições utilizáveis no concreto não é clara o bastante na literatura técnica.

Segundo o comitê 212 ACI (American Concrete Institute, 1985) as adições na forma de pó são classificadas conforme a seguir.

- Cimentícios: cimentos de origem natural ou cales hidráulicos produzidos a partir da queima de rochas calcárias argilosas, acontecendo também para os cimentos de escória granulada e de alto forno.
- Pozolânicos: Materiais com presença de silicatos e aluminatos, que sozinhos não possuem grande poder cimentício, mas quando na forma de pó junto com água, reagem com o hidróxido de cálcio, assim formando compostos com propriedades cimentíceas. Podemos citar como exemplo destes materiais as cinzas volantes, cinzas vulcânicas ácidas em estado natural ou calcinadas, argilas calcinadas, e subprodutos contendo sílica ativa, sílica reagente.
- Pozolânicos e Cimentícios: Cinza volante pertencente à classe C, cujo teor de cal livre presente produz reação cimentícia em presença de água. Escória granulada de alto forno possui as duas características.
- Outros: Material inerte do ponto de vista químico, estando na forma de pó, reage com a cal e os álcalis liberados na hidratação do cimento Portland, que com o tempo traz efeitos benéficos à permeabilidade, resistência mecânica e química. Exemplo destes materiais: quartzo, dolomita, rochas calcárias.

Malhorta e Mehta (1996) *apud* Geyer (2001) cita que os benefícios das adições de cinzas minerais ao concreto estão divididos em três classes: Benefício de ordem de engenharia, ecológica e econômica.

Os benefícios de engenharia permitem a melhoria das propriedades dos concretos no que diz respeito à trabalhabilidade, ganho de resistência, durabilidade ao ataque químico. As adições ao concreto ainda podem reduzir as fissuras térmicas diminuindo o calor de hidratação no concreto.

Benefício econômico se faz claro na redução do uso de cimento, sendo o material de maior custo presente na constituição do concreto. Com a adição de subprodutos industriais há uma redução no consumo do cimento, diminuindo os custos com a produção do concreto.

Os benefícios ecológicos são obtidos no momento em que se dá um destino correto aos resíduos de origem industrial, que muitas vezes contem grande carga de metais pesados e substâncias tóxicas, deixando de ser depositados em aterros e não mais contaminando o solo e águas subterrâneas. O problema é eliminado com a incorporação ao clínquer do cimento. O material reage com os minerais e após o endurecimento a contaminação por lixiviação é reduzida resultando em um material inerte, podendo ainda diminuir as taxas de emissão de CO₂, pois há uma redução do consumo cimento.

Mehta e Monteiro (1994) *apud* Geyer (2001) citam que adições pozolânicas são materiais silicosos moídos finamente e adicionados ao concreto em quantidades elevadas, em relação à massa do cimento Portland. Na tabela 2.15 mostra-se a seguir a classificação das adições pozolânicas e suas composições e características mineralógicas.

Tabela 2.15 – Classificação das adições pozolânicas de acordo com suas características.

Classificação/Material	Composição química mineralógica	Características das partículas
Cimentante e pozolânicos		
Escória granulada de alto forno	Na maior parte são silicatos vítreos contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio e sílica. Podem estar presentes em pequena quantidade compostos cristalinos do grupo melita.	O material não processado tem dimensões de areias e contem de 10 a 15% de umidade. Antes de ser empregado deve ser seco e moído até partículas menores de 45 µm (cerca de 500 m ² /kg de finura Blaine). As partículas tem textura rugosa.
Cinza volante alto-cálcio	Na maior parte vidro de silicato contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste geralmente de quartzo e C3A; podem estar presentes em carvão de elevado teor de enxofre. O carbono não queimado é comumente inferior a 2%.	Pó com 10-15% de partículas maiores que 45 µm (comumente Blaine entre 300 e 400 m ² /kg). Muitas partículas são esferas sólidas menores que 20 µm de diâmetro. A superfície das partículas é geralmente lisa, mas não tão limpas quanto às cinzas de baixo teor de cálcio.
Pozolanas altamente reativas		
Sílica ativa	É essencialmente constituída de sílica pura na forma não cristalina	Pó extremamente fino constituído de esferas sólidas de diâmetro médio de 0,1 µm (área específica por adsorção de nitrogênio 20 m ² /g)

Continuação Tabela 2.15 – Classificação das adições pozolânicas de acordo com suas características.

Pozolanas altamente reativas		
Cinza de casca de arroz	É essencialmente constituída de sílica pura na forma não cristalina	As partículas geralmente são menores que 45 µm, mas são altamente celulares (área específica por adsorção de nitrogênio 60 m ² /g)
Pozolanas comuns		
Cinza volante de baixo teor de cálcio	Na maior parte vidro de silicato contendo alumínio, ferro e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste basicamente em quartzo, milita, silimanita, hematita e magnetita.	Pó com 15-30% de partículas maiores que 45 µm (Blaine de 200-300 m ² /kg). A maior parte das partículas são esferas sólidas com 20 µm de diâmetro médio.
Materiais naturais	As pozolanas naturais contêm quartzo, feldspato e mica, além de vidro de alumino silicato	As partículas são moídas abaixo de 45 µm na maior parte tem textura rugosa.
Pozolanas pouco reativas		
Escória de alto forno e cinza de caca de arroz queimada no campo	Consiste essencialmente de silicatos cristalinos e somente uma pequena quantidade de matéria não cristalina	Os materiais devem ser moídos a um pó muito fino para desenvolver certa atividade. As partículas moídas têm textura rugosa

Fonte: Mehta e Monteiro (1994) *apud* Geyer (2001).

2.5.4 Pavimento e suas particularidades

Pavimento é a superestrutura constituída por uma combinação de camadas finitas, assentes sobre um terreno ou fundação o qual é designado subleito (Manual de Pavimentação do DNIT, 2006).

Cada camada do pavimento tem funções específicas. E estão divididas normalmente em: sub-base, base e revestimento. As camadas mais externas ao subleito vão ganhando melhores propriedades mecânicas, por ter que suportar maiores cargas.

2.5.4.1 Classificação dos pavimentos

Os pavimentos são classificados em sua maioria como rígidos e flexíveis. Esta classificação está relacionada com a transmissão das tensões para o subleito e o comportamento da estrutura de maneira geral.

Medina (1997) considera tradicionalmente duas estruturas de pavimentos:

- Pavimento flexível: Constituído por um revestimento betuminoso assente sobre base granular ou solo estabilizado granulometricamente.
- Pavimento rígido: É constituído por placas de concreto (em algumas situações armadas) assentadas sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária.
- Pavimento semirrígido: Em caso de bases cimentadas sob o revestimento betuminoso, o pavimento é considerado semirrígido. Quando o pavimento é reforçado de concreto asfáltico sobre uma placa de concreto é chamado de pavimento composto.

As camadas do pavimento possuem nomenclaturas. A seguir descreve-se os principais componentes presentes numa típica seção de pavimentos rígidos e flexíveis.

- Subleito: É a camada interna onde o pavimento é apoiado (fundação do pavimento). Antes da construção de uma rodovia é feito estudo de sondagem do terreno para saber a capacidade de carga e o comportamento referente às cargas impostas pelo tráfego. Normalmente é feito estudo do CBR do solo, caso o CBR seja menor que 2% o material é substituído por um de melhor qualidade. Caso ($2\% \leq \text{CBR} \leq 20\%$) é feito uma um reforço do subleito. Com o $\text{CBR} \geq 20\%$ a fundação pode ser usada como sub-base.
- Leito: É superfície do terreno do subleito obtida por terraplenagem ou obra de arte conformada ao greide e seção transversal.
- Reforço do subleito: Usado para nivelar o subleito por questões técnicas e econômicas a fim de melhorar as propriedades do subleito e regularizar a espessura base.

- Sub-base: Camada abaixo da base sendo complementar. Normalmente usada quando a base não tem capacidade de suporte adequada para transmitir os esforços para o subleito sendo uma alternativa econômica e técnica.
- Base: Camada que recebe os esforços originados pelo tráfego e tem função de resistir e distribuir estes ao subleito. É a camada sobre a qual o revestimento será construído.
- Revestimento: É a parte mais externa do pavimento, o mais impermeável possível, o qual recebe diretamente o tráfego e suas cargas. Tem função de dar segurança e conforto no rolamento dos veículos. Também chamado de capa, projetado para resistir aos esforços e intempéries.

2.5.4.2 Classificação dos solos na pavimentação

Solos podem ser definidos como materiais resultantes da decomposição da rocha mãe que lhes deu origem. Os agentes causadores do intemperismo podem ser físico ou químico e físico-químico.

Do ponto de vista da pavimentação, o solo pode ser descrito como material inconsolidado ou parcialmente consolidado, inorgânico ou não, que possa ser retirado sem o uso de explosivos ou técnicas especiais.

A classificação mais usada dos solos quanto à pavimentação é a do HRB (Highway Research Board), sendo aprovado em meados de 1945 substituindo o antigo sistema da Public Road Administration. O sistema do HRB considera a granulometria do solo, o limite de liquidez, limite de plasticidade e o índice de grupo (MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO DNIT, 2006). A Figura 2.7 e a Equação 2.1, a seguir, mostram, respectivamente, a classificação do HRB e a equação para o cálculo do índice de grupo (IG).

Classificação Geral	Materiais Granulares (35% ou menos passando pela peneira nº200)							Materiais Siltosos e Argilosos (mais de 35% passando pela peneira nº200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Porcentagem que passa nas peneiras de abertura nominal 2,00 mm 0,42 mm 0,074 mm	50 máx 30 máx 15 máx	50 máx 25 máx	51 mín 10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características da fração que passa na peneira 0,42 mm											
Limite de Liquidez (%)	-	-	-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de Plasticidade (%)	6 máx	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Índice de Grupo (IG)	0	0	0	0	0	<4	<4	<8	<12	<16	<20
Materiais predominantes	Pedra britada, pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia siltosa ou argilosa				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Regular a mau			

Figura 2.7 – Classificação dos Solos (Transportation Research Board).

Fonte: Manual do DNIT (2006).

$$IG = 0,2a + 0,05ac + 0,01bd \quad (2.1)$$

No qual temos:

- a: sendo o percentual que passa na peneira #200 menos 35; se % > 75% adota-se a=40; se % < 35, adota-se a=0. (a varia de 0 e 40);
- b: sendo o percentual que passa na peneira #200 menos 15; se % > 55% adota-se b=40; se % < 15, adota-se b=0. (b varia de 0 e 40);
- c: sendo o valor de LL menos 40; se LL > 60 adota-se c=20; se LL < 40%, adota-se c=0. (c varia de 0 e 20);
- d: sendo o valor do índice de plasticidade menos 10; se IP > 30%, adota-se d=20; se IP > 10%, adota-se d=0. (d varia de 0 a 20).

Outra classificação bastante utilizada é o do Sistema Unificado de classificação, Unified Soil Classification System (USCS), obtido a partir dos resultados da curva granulométrica do solo, calculando os coeficientes de não uniformidade (CNU) e de curvatura (Cc) juntamente com os limites de atterberg tem-

se a classificação do solo conforme podemos ver nas Equações 2.2 e 2.3. Mostradas a seguir.

$$\bullet \quad CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.2)$$

$$\bullet \quad Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (2.3)$$

Sendo:

- D_{10} : diâmetro correspondente a 10% do material que passa, tomado na curva granulométrica;
- D_{30} : diâmetro correspondente a 30% do material que passa, tomado na curva granulométrica;
- D_{60} : diâmetro correspondente a 60% do material que passa, tomado na curva granulométrica;

A Figura 2.8 mostra a classificação da USCS quanto a índice de plasticidade e limite de liquidez.

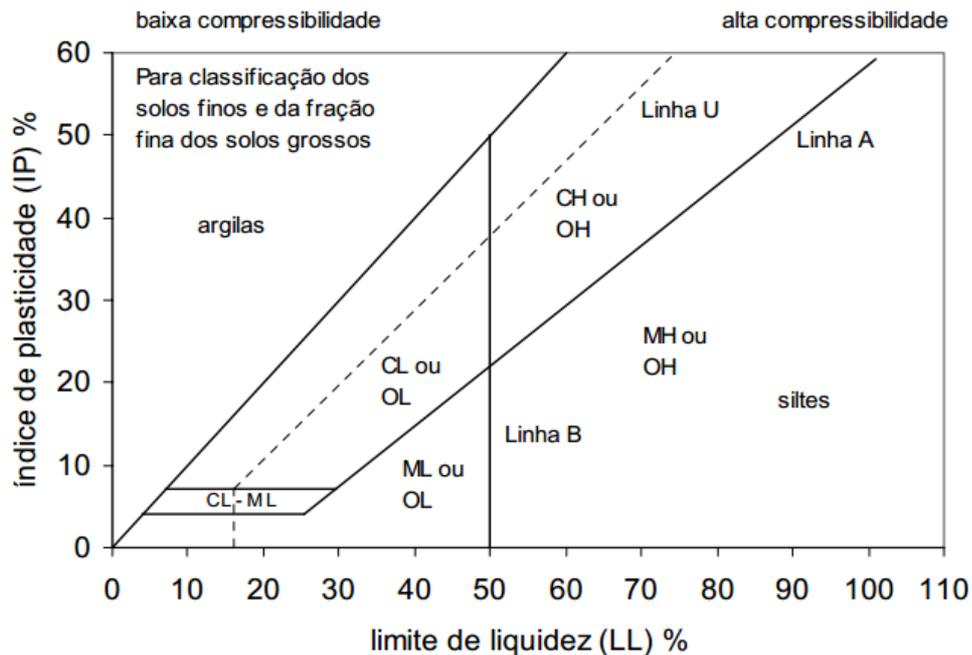


Figura 2.8 – Gráfico de plasticidade da classificação SUCS.

Fonte: Manual de pavimentação DNIT (2006).

2.6 Uso de resíduos sólidos e cinzas na construção e pavimentação

A construção civil é responsável pelo consumo de grande parte dos recursos naturais, transformando em produtos e estruturas, no qual estas transformações geram resíduos. No Brasil, muitas vezes a tecnologia e os métodos utilizados para produção não favorecem o aproveitamento da matéria prima e causam um problema para gestão dos descartes.

Resíduos são materiais resultantes de várias atividades tais como: indústrias, agricultura, habitação e mineração. Pesquisas em todo o mundo vêm sendo desenvolvidas, com o objetivo de reduzir o descarte dos resíduos, uma preocupação que traz ganhos quando se trata do custo benefício, pois aterros e terrenos onde estes são colocados estão cada vez mais escassos, além da necessidade de um grande volume que comporte as descargas, aliado a ter toda uma estrutura de proteção que minimize ou elimine a contaminação do meio ambiente. Os custos com o transporte e descarte são altos. Andreoli & Fernandes (1999) relatam que a disposição final do esgoto gera um custo de até 60% em relação às despesas de tratamento do resíduo.

Pesquisar e gerar um novo uso para o rejeito é a alternativa mais viável, uma vez que os fatores custos com transporte e armazenamento são atenuados e o principal ganho é com a preservação do meio ambiente. Pensando nisso, vários autores vêm trabalhando em suas pesquisas com o objetivo de incorporar resíduos na construção civil e em pavimentos. Os rejeitos são adicionados principalmente na forma de filler em concreto asfáltico, ou na forma de cinzas. Sendo o resíduo calcinado em mufla incorporando ao traço solo-cal ou solo-cimento, pois em muitos casos há um ganho na resistência e melhoria nas propriedades mecânicas do solo, as atividades pozolânica das cinzas ajudam com as reações que acontecem com a sílica livre e a cal presente no cimento.

A pavimentação consome uma grande quantidade de recursos, e o emprego de resíduos pode ser vantajoso, pois pode poupar recursos e matéria prima, unindo a economia com o descarte adequado e o benefício da obra. Porém para utilização do resíduo é preciso fazer investigações, no qual algumas são descritas a seguir.

O seu uso deve ser concebido após ensaios que comprovem sua viabilidade quanto às propriedades de engenharia como: resistência, durabilidade, impacto ambiental gerado com o seu uso e estudos de lixiviação, dentre outros.

Algumas das investigações para viabilidade da utilização dos resíduos são:

- Verificar a minimização dos impactos ambientais: redução de emissões de fumaça, entulhos, odores dentre outros benefícios que justifiquem o uso;
- Viabilidade econômica o beneficiamento ou não do recurso, estudo que traz os benefícios e custos, fazendo comparações para um futuro uso do rejeito;

De acordo com FHWA (2008) uma combinação variada com resíduos que estão sendo usados na pavimentação e é descrita na Tabela 2.16.

Resíduos podem ser aplicados na pavimentação, desde que o seu reaproveitamento não traga nenhuma perda das propriedades do pavimento, e que o desempenho do mesmo não seja comprometido. Alguns exemplos de pesquisas estudadas com o uso de escória de aciaria no Brasil foram feitos. Podendo-se citar:

Rohde (2002), Castelo Branco (2004), Raposo (2005), Oliveira (2006), Freitas (2007) e Pena (2007).

Outros como Pinto (1971), Nardi (1975), Marcon (1977) e Farias (2005) estudaram a aplicação de cinzas de carvão para camadas de pavimentos.

Estudos feitos com resíduo sólido da construção civil foram realizados por Fernandes (2004), Motta (2005) e Leite (2007).

Tabela 2.16 – Combinação de vários resíduos materiais/aplicações em pavimento.

Material	Aplicação					
	Concreto asfáltico	Concreto Cimento Portland	Base Granular	Aterro	Base estabilizada	Aterro hidráulico
Pó de asfalto (Baghouse fines)	x					
Escória de alto forno (Blast furnace slag)	x	x	x	x		
Cinza de fundo/escória de carvão (Coal bottom ash/boiler slag)	x		x	x	x	
Cinza volante de carvão (Coal fly ash)	x	x		x	x	x
Desulfuradores de gases de combustão (FGD scrubber material)					x	x
Areia de Fundição (Foundry sand)	x	x		x		x
Fuligem (Kiln dusts)	x				x	
Resíduos de mineração (Mineral processing wastes)	x		x	x		
Cinza de incineração de (MSW combustor ash)	x		x			
Escórias não ferrosas (Nonferrous slags)	x		x	x		

Continuação Tabela 2.16 – Combinação de vários resíduos materiais/aplicações em pavimento.

Material	Aplicação					
	Concreto asfáltico	Concreto Cimento Portland	Base Granular	Aterro	Base estabilizada	Aterro hidráulico
Subprodutos de pedra (Quarry byproducts)						x
Revestimento asfáltico reciclado (Reclaimed asphalt pavement)	x		x	x		
Concreto reciclado (Reclaimed concrete material)			x	x		
Telhas de cobertura (Roofing shingle scrap)	x					
Borracha de pneus (Scrap tires)	x (úmido e seco)			x		
Cinza de lodo de esgoto (Sewage sludge ash)	x					
Escória de aciaria (Steel slag)	x		x			
Resíduos de sulfatos (Sulfate waste)					x	
Resíduos de vidro (Waste glass)	x		x			

Fonte: FHWA (2008).

2.6.1 Utilização de solo-cinza de casca de arroz em pavimentos

Segundo Velupillai *et al.* (1996), a casca de arroz é um dos mais abundantes entre os subprodutos resultantes da produção agrícola de grãos e a disposição final deste resíduo é um dos maiores problemas existentes nos países produtores de

arroz. Sendo mais de 100 milhões de toneladas de casca de arroz são geradas por ano no mundo.

No Brasil, a produção de arroz está em torno de 10 milhões de toneladas por ano, sendo o estado do Rio Grande do Sul o que mais produz com uma participação de 49,5% do total, que chega a 5.146,595 toneladas (Behak, 2007).

2.6.1.1 Pesquisa com cinza de casca de arroz

Behak (2007) analisou a viabilidade técnica de estabilizar-se um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz (CCA) e cal. O solo estudado apresentou baixo poder suporte, sendo pouco adequado para camadas de sub-base e base de pavimento rodoviário. O uso de cimento com cal é muito custoso e não tinha propriedades adequadas. Dois tipos básicos de CCA foram utilizados: uma cinza residual do processo de queima de casca de arroz em um forno sem controle de temperatura, e cinzas produzidas em laboratório por incineração de casca de arroz a diferentes temperaturas controladas. Foram realizados ensaios de difratogramas de raios-X, compactação, capacidade de suporte (ISC), compressão simples, tração por compressão diametral e durabilidade do solo, das CCA e das misturas solo-CCA-cal. As CCA produzidas à temperatura controlada entre 650°C e 800°C mostraram uma maior atividade pozolânica devido a sua estrutura amorfa. Os valores máximos de módulo de deformabilidade e resistência à compressão simples foram obtidos para as misturas com CCA à temperatura controlada. As misturas solo-CCA-residual-cal, desenvolveram resistência à tração demonstrando a ocorrência de reações pozolânicas. A estabilização de solo sedimentar arenoso com CCA e cal mostraram-se eficaz, permitindo o uso destes materiais em camadas de sub-base de pavimentos.

2.6.2 Utilização de Solo cinza-carvão em pavimentos

A cinza de carvão é gerada após a incineração do carvão e os principais tipos de cinzas encontradas na queima do carvão são: cinzas de fundo (bottom ash) e as cinzas volantes (fly ash), cinzas volantes o termo é dado por serem bastante leves em forma de pó podendo voar com facilidade.

O grande problema da geração de energia através da queima do carvão é a poluição do meio ambiente, partículas em suspensão contaminam o ar, e o rejeito

gerado muitas vezes não tem local apropriado para ser armazenado além disso o grande custo com a energia para tal processo. O aproveitamento de cinzas vem ganhando espaço no campo de pesquisa em todo o mundo. Cinzas volantes têm propriedades que permitem em muitos casos estabilizar solos, através da estabilização química e/ou mecânica, modificando sua densidade, aumentando a resistência mecânica, diminuindo a expansão dentre outros ganhos (ACCA, American Coal Ash Association, 2003).

2.6.2.1 Pesquisas utilizando cinza de carvão na pavimentação

Várias pesquisas foram impulsionadas pelo ganho de resistência nos solos e outras propriedades com aplicação de cinza de carvão em camadas de pavimentos, na estabilização de solos segundo ACAA, (2003) são várias as melhorias alcançadas. Podemos citar alguns benefícios nas propriedades de engenharia após o uso de cinza no solo, tais como: ganho de resistência, controle de expansão e contração, controle da umidade dos solos.

Alguns fatores interferem na resistência à compressão dos solos tratados com cinzas volantes. São eles:

- A quantidade ou teor de cinza, o qual deve ser determinado a partir de ensaios de laboratório com estudo do teor ótimo;
- A umidade usada na mistura solo-cinza o que poderá permitir um ganho de compactação e resistência;
- O grau de compactação, a energia necessária para atingir os resultados esperados;

Alguns parâmetros são importantes e podem ser analisados, comportamento solo-cinza a fim de observar as mudanças com a adição da cinza em relação ao solo puro, tais como: expansão do solo, no caso de solos com alto teor de sulfatos, trabalhabilidade influenciada pela plasticidade da mistura dentre outros fatores.

Nardi (1975) em seu estudo posteriormente complementado por Marcon (1977) comprovou a estabilização mecânica de areia com cinza volante e a cal. Foi implantado um trecho experimental nas margens de um trecho BR-101, localizado no município de Imbituba/SC. Na ocasião, sobre o subleito de areia foi colocado uma

sub-base de areia estabilizada com cal e cinza volante. O autor cita que processos de estabilizações clássicos são de difícil aplicação a solos mal graduados ou no caso de solos uniformes, como areias uniformes, a cimentação do solo é dificultada devido ao grande volume de vazios não preenchidos pelos finos diminuindo o número de contatos entre as partículas do solo. Os equipamentos e instrumentos da pesquisa trecho em estudo permitiram o monitoramento e os resultados foram satisfatórios.

Marcon (1977) a fim de complementar a pesquisa de Nardi (1975), desenvolveu ensaios de durabilidade e módulo de elasticidade em traços envolvendo as misturas areia, cinza volante e areia, brita, cinza volante, cal e cimento. Em seus resultados que foram favoráveis mostrou aptidão da cinza na aplicação em base e sub-base. No seu estudo, ainda, ressaltou a preocupação com a cura e as solicitações do tráfego. Foi ainda avaliada a rigidez da base, de modo a promover a redução das tensões verticais transmitidas ao subleito, prologando a vida útil do pavimento. A importância da cura se deve ao fato aumentar a resistência dessa mistura, reduzindo o desenvolvimento de fissuras no material.

Farias (2005) relata que o uso de cinzas de carvão mineral no Brasil se deu a partir da substituição do clínquer Portland por cinza na fabricação de cimento Portland pozolânico. Sendo uma realidade de uso em obras de engenharia rodoviária em países como Estados Unidos e Reino Unido. Em seu estudo avaliou o comportamento mecânico das misturas com solo/cinza de carvão/cal, a cinza de carvão utilizada foi a de fundo. Sendo caracterizadas curvas de compactação do solo e misturas, capacidade suporte e resistência à compressão simples. O solo estudado foi do tipo A-5 classificado pela HRB, a cinza pesada de fundo coletada na região de Tubarão-SC com baixa capacidade de suporte e expansão variando de 1,5% a 3,5%. Nas misturas solo/cinza estudadas ocorreu uma estabilização granulométrica, melhorando o comportamento geotécnico. Os valores de CBR das misturas solo/cinza foram de 20% o que habilitaria o uso em camadas final de terraplenagem. Porém quando as misturas são analisadas quanto ao comportamento dinâmico, apresentam um péssimo comportamento, o que não

viabiliza o seu uso em camadas de terraplenagem. As estabilizações utilizando os traços solo/cinza e cal melhoraram significativamente a capacidade de suporte das misturas, cujos valores chegaram próximo a 60%, permitindo o uso em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis.

Rosa (2009) relata que as reações que ocorrem entre solo, cinza volante, cal e água são bastante complexas, neste fenômeno físico-químico, uma parte da cal reage com as partículas do solo e outra parte interage CO_2 presente nas fases água e ar do solo, em uma terceira etapa de reações, a cal remanescente combina-se com a cinza volante, reação de natureza pozolânica.

Lopes (2011) avaliou a utilização de cinzas de carvão (fundo e volante) na aplicação de camadas de base de pavimentos. O solo estudado foi o A-2-4 da classificação SUCS. Realizou ensaios de caracterização geotécnica e mecânica das misturas solo/cinzas. E em suas análises mecanísticas empíricas, os valores de módulos resilientes obtidos nos ensaios mostraram que é viável a utilização de cinzas de carvão como aditivo ao solo para utilização em base de pavimentos de baixo volume de tráfego.

2.6.3 Utilização de solo-cinza de RSU em pavimentos

Cinzas de RSU são menos utilizadas e estudadas na estabilização de solos do que cinzas de carvão, visto que existem mais usinas termoelétricas de carvão do que as de RSU. Mas em comparação com a cinza de carvão o comportamento sobre os efeitos e mecanismos de solos estabilizados com resíduos sólidos são muito parecidos, principalmente se a origem do resíduo for orgânica (Vizcarra, 2010).

O uso de cinza de fundo de RSU é consagrado em alguns países. Até mais utilizada que a cinza volante, no caso do leste dos Estados Unidos vem sendo utilizada em obras de pavimentação, como estabilização de base e sub-base. Na Europa, já é utilizada como material para aterro e base de rodovias há mais de duas décadas. Devido termoelétricas de carvão ser a fonte de energia usada nos países

como a Alemanha, Holanda e Dinamarca, gerando grande quantidade de cinza de fundo, este resíduo vem sendo utilizado cerca de mais de 50% como material de base e aterros para rodovias (FHWA, 2008).

2.6.3.1 Pesquisas utilizando RSU em pavimentos

Em sua pesquisa, Goh e Tay (1993a) *apud* Vizcarra (2010) relata que o uso de cinza volante de RSU como material de aterro é viável, pois, possuem alta permeabilidade e resistência, típico de material granular, obtendo densidades menores, quando compactadas, que aterros convencionais. Os autores também avaliaram o uso de cinza volante na estabilização de solo ao invés de usar cimento ou cal, por fim acharam que a mistura solo-cinza apresentou ganho de resistência ao cisalhamento e com menor compressibilidade que os solos não tratados. Houve um ganho de resistência ao cisalhamento não drenado com a idade acompanhado do aumento do teor de cinza volante de RSU para os solos estabilizados. A mistura com maior teor de cinza volante obteve uma maior taxa de endurecimento e foi também a mais rápida. Após os 80 dias de cura, a resistência ao cisalhamento não drenado do solo tratado aumentou de 1,9, 2,5 e 3 vezes para as misturas com 10%, 20% e 30% de cinza volante, respectivamente. O solo estabilizado com cimento obteve maiores ganhos em resistência como mostra a (Figura 2.9). Depois dos 80 dias de cura, a mistura com 5% de cinza volante de RSU mais 5% de cimento apresentou uma resistência cerca de 4% maior que a resistência do solo estabilizado somente com cimento. Algumas conclusões dos autores sobre os resultados obtidos foram que a cinza volante de RSU tem viabilidade para estabilização de solos argilosos, podendo aumentar de duas a três vezes a resistência quando comparada ao solo natural, quando necessários ganhos maiores de resistência pode-se usar a cinza volante em combinação com cimento ou cal.

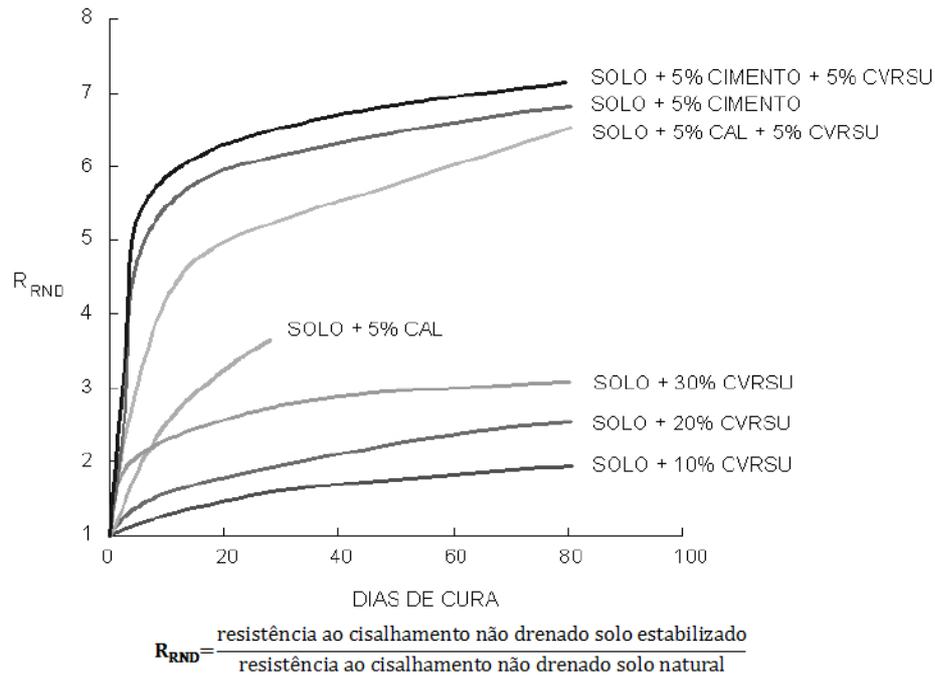


Figura 2.9 – Efeito do tempo de cura sobre o solo estabilizado com CVRSU, cal e cimento

Fonte: Goh e Tay (1993) *apud* Vizcarra (2010).

O estudo de lixiviação da cinza volante comparado com o solo estabilizado com cinza volante juntamente com cal ou cimento da pesquisa de Goh e Tay (1993b) mostrou que o lixiviado da cinza volante não estabilizada não atende às normas de qualidade da água potável. Destacaram que uma pré-lavagem da cinza poderia solucionar o problema da lixiviação dos metais pesados.

Em pesquisa Ferreira *et al.*, (2003) relatam que a Cinza Volante de RSU pode ser usada em substituição da areia e/ou cimento para bases e sub-bases com estabilização usando cimento. Uma preocupação com o uso são a da contaminação das águas subterrâneas por substâncias lixiviadas da base.

Em Portugal, Almeida *et al.*, (2009) avaliaram o comportamento em trechos rodoviários, utilizando escória de RSU em substituição a agregados naturais. Concluindo que é possível a utilização em aterros e leitos de pavimentos e em camadas de sub-base com baixo tráfego.

Como importante fator de ganho de resistência não diferente da maioria das cinzas usadas na estabilização de solos, utilizadas como substituto parcial ou total do cimento ou cal, a cinza volante de RSU toma vantagens de suas características pozolânicas, a presença de sílica ativa em contato com a cal livre presente no cimento ou cal faz com aconteça cimentação responsável por este ganho de resistência e a justificativa do uso deste produto na pavimentação.

Os valores de densidade real da cinza de RSU variam entre 1,7 – 2,4, quando em areias e materiais de aterro ficam acima de 2,5 dando a vantagem a cinza para o uso em substituição de solos moles compressíveis, uma vez que diminui as cargas nas fundações, resultando em menores recalques (Vizcarra, 2010). Em seu estudo concluiu que a adição de cinzas ao solo estudado A-7-5 teve influência favorável, reduzindo a expansibilidade do solo, o emprego de 40% de cinza volante mostrou-se viável para fins de pavimentação.

2.6.4 Adição de cinza de lodo de esgoto na produção de cimento, concreto e pavimentos

Nos EUA e Japão o lodo vem sendo reciclado e diferentes alternativas de destino são dadas ao rejeito (Geyer, 2001).

Na 11ª Conferência Americano-Japonesa sobre a Tecnologia de Tratamento de Esgotos Sanitários Geyer (2001) referencia o evento que teve um caráter impactante quanto ao incentivo de disposição final do lodo, reciclagem e a aplicação dele como insumo e na fabricação de produtos. Existem três áreas básicas de referência de pesquisa para aplicação do lodo dada pela “ACE PLAN Japonês”, Areawide Sewage Sludge Treatment and Disposal Project: (A) agricultura, (C) construção e (E) energia.

No Brasil, a maioria do lodo (cerca de 80%) é descartada em aterros sanitários sem que haja um uso benéfico, uma parcela pequena de 5% é usada na agricultura, mas esta realidade vem mudando a cada ano, o lodo vem sendo cada vez mais reciclado e incorporado a outros materiais da construção civil como podemos ver em algumas pesquisas citadas a seguir.

2.6.4.1 Pesquisas utilizando cinza de lodo

2.6.4.1.1 Adição de cinza de lodo a concreto

Tay (1987) *apud* Geyer (2001) afirma que em todas as idades analisadas dos concretos produzidos com adição de cinza houve quedas nas resistências a compressão. Aos 28 dias de cura, o traço com adição de teores de cinza de até 10% provocaram decréscimos na resistência de até 11%, podendo ser aceitável segundo o autor. Enquanto com adições superiores a queda na resistência foi muito maior, atingindo próximo de 33% de perda com adições de 20% de cinza.

Monzó *et al.* (1996) em seu estudo da composição química da cinza de lodo de esgoto CLE e sua granulometria. Analisando por microscopia óptica de varredura mostrou que as partículas da cinza possuem tamanho irregular, influenciando na trabalhabilidade das argamassas. Obteve a seguinte conclusão de que ao substituir 15% de cimento Portland por cinza e avaliar a resistência à tração e à compressão dessa mistura teve um ganho. O autor atribui possivelmente o ganho às propriedades pozolânicas da mesma.

Fontes (2003) avaliou a viabilidade da utilização de cinza de lodo de estação de tratamento de esgotos como substituto parcial do cimento Portland na produção de argamassas e concretos. Os resultados obtidos foram que o uso da cinza de lodo de esgoto é viável tecnicamente, pois há melhoria das propriedades investigadas e, com a redução no consumo de cimento, tem um ganho econômico e a cinza atua como filler. A análise ambiental mostrou que o concreto conseguiu reter de forma segura a cinza de lodo de esgoto em sua matriz cimentícia.

Em outro estudo, Geyer (2001) empregou cinza de lodo de ETE, estações de tratamento de esgotos sanitários, como adição ao concreto. Obteve bons resultados, onde mostraram que a cinza de lodo pode ser utilizada como adição ao concreto, com efeito predominante de filler, com percentuais de até 20%. Analisando os ensaios de resistência a compressão simples, confirmou que o fator água/aglomerante como o maior fator determinante na determinação desta propriedade do concreto. Observou que a adição de cinza de lodo sanitário aos concretos com $a/(c+ad)$ no intervalo de 0,50; 0,65 e 0,80 influenciou de maneira

negativa a resistência. No concreto com o fator $a/(c+ad)$ de 0,95 a 1,10 ocorreu aumento de resistência.

2.6.4.1.2 Cimento produzido a partir de cinza de lodo

Morales (1994) confirmou a atividade pozolânica do lodo calcinado entre as temperaturas de 700°C a 800°C devido à presença do mineral montmorilonita, sendo possível substituir cerca de 35% do consumo de cimento Portland.

Onaka (2000) *apud* Santos (2003) cita em seu trabalho que no Japão cerca de 70% das tortas de lodo são incineradas. Parte da cinza e da escória derretida é utilizada na agricultura e na fabricação de materiais de construção. Um exemplo é o uso em base de pavimentação. O processo sugerido pelo autor consistiu em teste durante nove meses consecutivos em uma fábrica de cimento. Em resumo, o processo consistia em secar o lodo, transformando-o em pellets, conservando o teor de matéria orgânica. Estes pellets entram no forno junto com a matéria prima do cimento e são queimados juntos. Com isso a matéria orgânica é utilizada como fonte complementar de calor e a parte inorgânica se liga ao clínquer produzido. Diante dos bons resultados dos testes e considerando uma incorporação de 2% de lodo seco sobre a quantidade de cimento produzida, 90 milhões de toneladas/ano, todo o lodo do Japão – 1,70 milhões de toneladas seca/ano poderia ser absorvido por este processo, dispensando o alto consumo de energia por incineradores, reduzindo o consumo de energia nas cimenteiras, reaproveitando a matéria inorgânica e evitando o uso de aterros sanitários. Concluindo que há sim benefícios ambientais e econômicos.

Tay & Show (1991) *apud* Geyer (2001) desenvolveram um método de produção de um cimento a partir de uma mistura de cinza de lodo de esgoto com cal. Observando-se base a análise química e os ensaios para medir a atividade pozolânica e a resistência. O melhor cimento produzido foi o de 50% de lodo e 50% de pedra calcária (CaCO_3), em massa, com temperatura de 1000°C e tempo de residência de 4 horas. O cimento produzido não mostrou problemas quanto à expansão, o tempo de início de pega foi rápido, isto se deve ao fato da falta de adição de gipsita, como ocorre nos cimentos convencionais, e reatividade pozolânica

foi baixa. A resistência à compressão aos 28 dias atingiu 6,28 Mpa, 27% da resistência obtido por um cimento Portland comum.

2.6.4.1.3 Adição de Cinza de lodo para produção de concreto de alto desempenho

Fontes (2011) fez uso da adição de Cinza de lodo de esgoto (CLE) juntamente com a de resíduo sólido urbano (CVRSU) como aditivo mineral para produção de concreto de alto desempenho. Ao final do seu trabalho, pode concluir que tanto a incorporação de cinza de lodo como a de cinza de resíduo sólido urbano mostraram-se uma alternativa viável do ponto de vista técnico e ambiental.

2.6.4.1.4 Adição de Cinza de lodo e lodo na pavimentação

Al Sayed *et al.* (1995) fizeram uso de cinza de lodo de esgoto como material de enchimento mineral de misturas de concreto asfáltico no Bahrain. Os resultados mostraram que a cinza pode ser empregada como filler, pois todas as especificações de Bahrain para concreto asfáltico foram satisfeitas. Concluíram ainda que o desempenho do resíduo como filler em ambientes quentes é satisfatório, pois a estabilidade e a fluência Marshall testada a elevadas temperaturas de 70° e de 80°C tiveram bom desempenho.

Medeiros (2006) usou a parcela do lodo de uma ETE em Natal/RN que passou na peneira N°. 200 e após ser seca em estufa e calcinada a uma temperatura de 900°C durante 3 horas em mufla foi usada como filler, material de enchimento em concreto asfáltico. Comparou o uso de cimento como filler e o lodo calcinado em substituição ao cimento nas proporções de 1%, 2% e 3%. Concluiu que as misturas com lodo calcinado e com o cimento apresentaram idêntico comportamento mecânico, atendendo as especificações do DNIT. A mistura com 1% de lodo calcinado apresentou melhor desempenho volumétrico e mecânico. As misturas com lodo calcinado apresentaram menor susceptibilidade à umidade do

que as de cimento, houve uma diminuição do volume de vazios com o uso da cinza e aumento da estabilidade. Os resultados quanto análise ambiental mostraram que o uso da cinza não oferece risco.

Feitosa (2009), em sua pesquisa com estudos alternativos do aproveitamento do lodo de esgoto, analisou o uso de lodo tratado de uma (ETE) para melhoramento de um solo colapsível, uma areia siltosa, classificada como solo A-2-4. Foram adicionados 5%, 10% e 15% de lodo em substituição a massa do solo e os resultados satisfatórios. Dentre as conclusões sobre mistura e materiais envolvidos, observou-se que os lodos não podem ser considerados como um resíduo único, pois constituem uma família diferente de lodos de diferentes tipos de ETE. Há alterações físicas, químicas e micro estruturais no solo ao ser adicionado o lodo ao solo natural. Ao manter o mesmo peso específico aparente seco da mistura solo-lodo, ao acrescentar lodo acarreta na redução do índice de vazios do solo o que justifica uma menor compressibilidade ao adicionar lodo. O lodo mostrou-se adequado para melhoramento de solos colapsíveis.

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo apresentam-se os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, bem como a metodologia para sua realização. Os ensaios foram realizados nos laboratórios de Solos e Concreto do Núcleo Tecnológico e no LARHISA, Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, todos pertencentes ao Departamento de Engenharia Civil da UFRN.

As etapas da pesquisa são detalhadas neste capítulo, desde a coleta dos materiais, preparação, até os ensaios que avaliaram o comportamento das misturas estudadas para estabilização do solo em estudo.

3.1 Materiais

O trabalho foi conduzido com o uso de um solo residual coletado de uma antiga jazida situada próximo ao distrito de Pium, no município de Parnamirim/RN. Foi feito o estudo da estabilização química do solo, utilizando o cimento Portland comum, CP II – Z – 32 e as cinzas de lodo de uma lagoa de estabilização anaeróbia situada próxima ao km-6 da BR 226.

A jazida de solo fica situada próxima a região descrita na figura 3.1 com localização geográfica de 5º 57' 12" S e 35º 14' 26" O. O lodo tem sua localização próxima ao ponto 5º 49' 52" S e 35º 16' 43" O e descrito na figura 3.2.

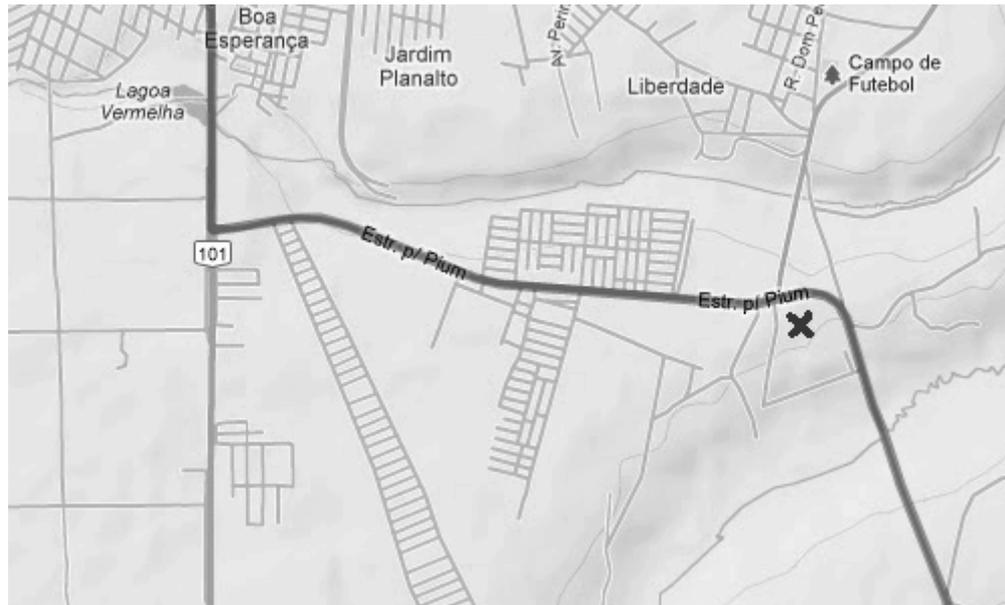


Figura 3.1 – Localização da jazida próxima à estrada do distrito Pium Parnamirim/RN.

Fonte: (<http://maps.google.com.br> acessado em 05/10/2012).



Figura 3.2 – Localização da lagoa anaeróbia, próxima ao km-6 BR 226, Natal/RN.

Fonte: (<http://maps.google.com.br>, acessado em 05/10/2012).

3.1.1 Coleta e preparação dos materiais

3.1.1.1 Solo

O solo estudado na pesquisa é um solo fino de coloração vermelha, bastante presente no litoral do nordeste brasileiro coletado próximo a município de Parnamirim/RN em uma jazida desativada. Após a coleta o material foi colocado em sacos lacrados e armazenados no Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia Civil da UFRN.

A Figura 3.3 abaixo mostra o solo coletado.

Figura 3.3 – Solo de coloração avermelhada.



O material foi armazenado em sacos indenticados, ficando guardado no laboratório de solos do DEC/UFRN e posteriormente secos ao ar livre para os ensaios. A Figura 3.4 mostra os sacos contendo o solo e o local onde foi armazenado. Foram duas coletas resultando em total de 200 kg de solo.



Figura 3.4 – Sacos contendo solo da pesquisa.

3.1.1.2 Aglomerante

O aglomerante hidráulico utilizado foi o cimento Portland comum, CP II – Z – 32, usado em proporções definidas. Adquirido em loja de material de construção. O cimento foi estocado em vidros hermeticamente fechados e identificados para que não sofressem contaminação nem ação da umidade.

3.1.1.3 Lodo

A amostra utilizada na pesquisa foi proveniente de uma empresa de limpeza de fossa da cidade de Natal/RN. Após a coleta o lodo foi seco ao ar com intuito de reduzir a umidade para a queima posteriormente em mufla e colocado em sacos e dentro de depósitos para que não houvesse contaminação nem contato com umidade. Na Figura 3.5 a seguir tem-se lodo coletado. Foi feita uma coleta que resultou em 60 kg do material.



Figura 3.5 – Lodo coletado.

A Figura 3.6 mostra o local da coleta do lodo, na lagoa de estabilização anaeróbia da empresa Limpa-Fossa Potiguar, situada próxima ao km-6 da BR 226 no município de Natal/RN.



Figura 3.6 – Local da coleta do lodo.

Após a coleta do material e uma prévia secagem ao ar o passo seguinte foi calcinar em uma mufla no LARHISA. O lodo ficou durante 2 horas a uma temperatura de 550°C, transformando-se em cinza de lodo, matéria prima utilizada na pesquisa.

A Figura 3.7 abaixo apresenta a foto da cinza de lodo após queima em mufla.

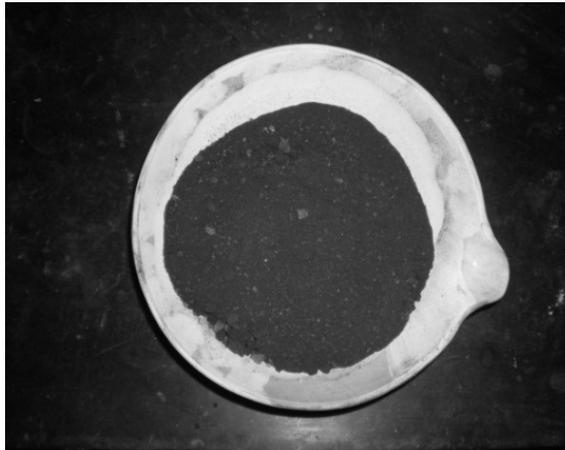


Figura 3.7 – Lodo calcinado.

3.2 Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas, como o mostra o fluxograma na Figura 3.8. Na primeira, foi feita a coleta dos materiais; Na segunda fez-se a caracterização química e física dos materiais empregados. Por fim, na terceira, foi realizado o estudo do comportamento mecânico das misturas solo-cimento e solo-cimento-cinza de lodo.

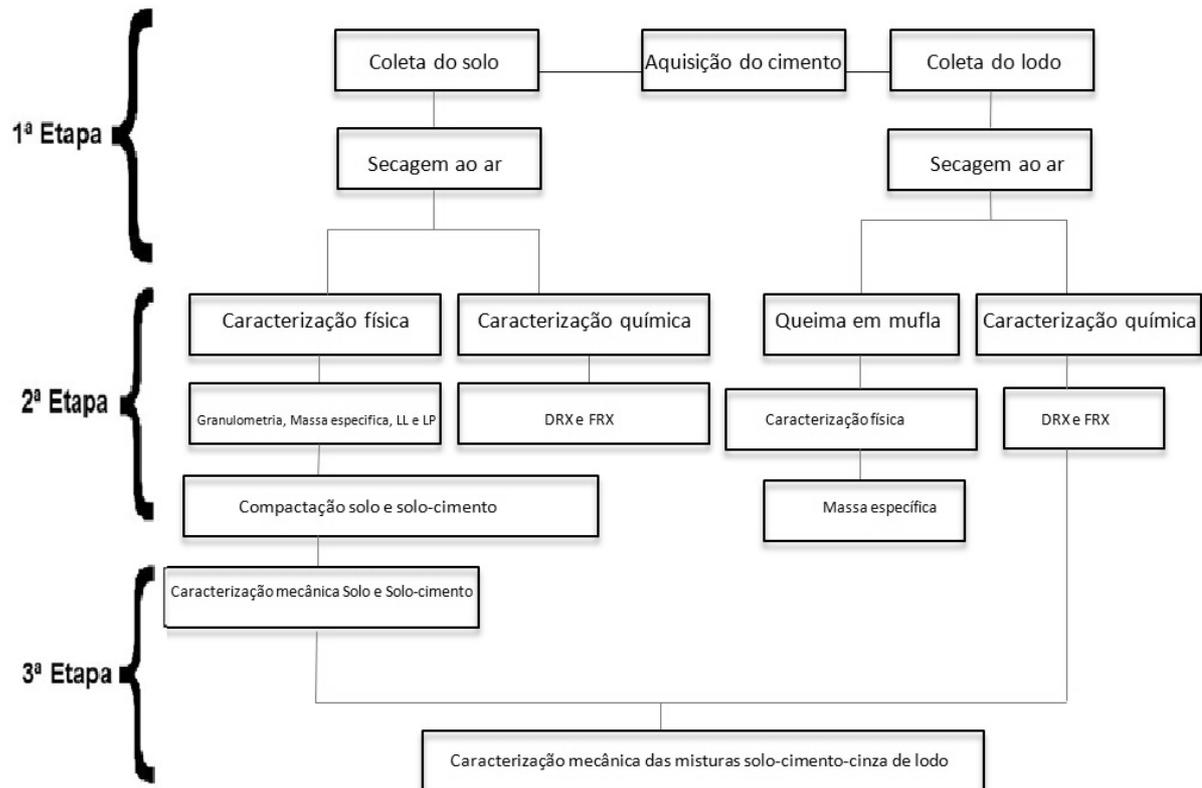


Figura 3.8 – Fluxograma da pesquisa.

3.2.1 Caracterização física e química dos materiais

Na primeira etapa, realizou-se a coleta do solo e do lodo e aquisição do cimento, com a preparação dos materiais para os ensaios para que na segunda etapa fosse feita as caracterizações.

Na segunda etapa foram feitos os ensaios de caracterização geotécnica, Limite de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP), Massa específica dos grãos (ρ_s), Granulometria, análise química quantitativa e qualitativa do solo, lodo e cinza de lodo.

3.2.1.1 Massa específica real dos grãos

Para a determinação da massa específica real dos grãos foi realizado o ensaio segundo a NBR 6508/1984 – Massa específica real dos grãos, utilizando amostras deformadas do solo.

Para a cinza e o cimento foi utilizada a norma NBR 6474/1984.

3.2.1.2 Limites de Consistência

Visando caracterizar a interação do solo e da cinza com a água, os ensaios de limite de liquidez e de limite de plasticidade foram realizados segundo:

- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.

3.2.1.3 Análise Granulométrica

A análise granulométrica do solo foi realizada conforme a NBR 7181/1984 (ABNT, 1984). Como o solo em estudo é constituído de fração grossa e fina foi realizado esse ensaio por meio da granulometria conjunta, isto é, peneiramento e sedimentação. Para a etapa correspondente à sedimentação foram realizados ensaios com defloculante (hexametáfosfato de sódio).

3.2.1.4 Análise Química

Para identificação química dos materiais solo, lodo e cinza de lodo passaram por um processo de britagem, moagem e quarteamento, e parte do pó, onde no laboratório do CT-Gás/RN foram submetidos à análise de difração de raios X e FRX para determinação quantitativa e qualitativa química.

3.2.2 Estudo do comportamento mecânico do solo e das misturas SC e SCCLE

3.2.2.1 Estudo do comportamento mecânico do solo e SC

Na terceira etapa foram determinadas as propriedades mecânicas do solo, e misturas solo-cimento e solo-cimento-cinza de lodo.

3.2.2.1.1 Ensaio de Compactação do solo e SC

O estudo da compactação do solo natural e solo-cimento serviram para determinar os valores de umidade ótima e massa específica máxima seca, que foram utilizados no ensaio de CBR que foi moldado na energia normal. Os resultados também serviram para moldagem dos cp's do ensaio de compressão simples nas várias energias. Os teores de cimento e cinza de lodo podem ser descritos pelas Equações 3.1 e 3.2 respectivamente mostradas abaixo.

$$\bullet \text{ Teor de cimento (\%C)} = \left(\frac{\text{Massa do cimento}}{\text{Massa do solo seco}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

- Teor de cinza de lodo (%CLE) =
$$\left(\frac{\text{Massa da cinza}}{\text{Massa do solo seco}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

A Figura 3.10 mostra a foto de um corpo de prova de solo puro moldado para ensaio de compactação.



Figura 3.9 – Corpo de prova do solo natural (Ensaio de compactação).

Os traços utilizados para determinação das curvas das amostras de solo e solo-cimento estão descritos na Tabela 3.1.

Energia	% solo	% cimento	% cinza
Normal, intermediária e modificada.	100	-	-
	97	3	-
	94	6	-
	91	9	-

Tabela 3.1 – Traços com percentual de cada material e energia de compactação para definição das curvas de compactação solo-cimento.

O ensaio de compactação adotou apenas traços envolvendo solo-cimento. Tal procedimento teve como finalidade a economia da cinza, uma vez que a obtenção de cinza demandava muito tempo; e em uma queima levava-se em torno de 4 horas desde a estabilização da temperatura da mufla até a calcinação do resíduo, sendo aproveitado apenas cerca de 35% da massa em relação a massa bruta do lodo.

3.2.2.1.2 Ensaio CBR do solo

No caso do solo natural, a sua capacidade de suporte e sua expansibilidade foi avaliada utilizando o ensaio de CBR, medindo a resistência à penetração de uma amostra saturada compactada na energia normal. Permitindo comparar suas características para uso em camadas de base e sub-base de pavimentos.

Foram moldados 5 cp's com as umidades obtidas no ensaio de compactação do solo natural, moldados na energia normal. Foram verificadas as expansões após a saturação dos cp's durante 96 horas e em seguida os valores de CBR do solo na prensa. A norma utilizada para o ensaio foi a NBR 9895/1987 – Solo – Índice Suporte Califórnia.

3.2.2.1.3 Ensaio de Compressão Simples do solo e SC

Os ensaios de resistência à compressão simples foram feitos primeiro com o solo e solo-cimento para definir qual a porcentagem de cimento mínima atendia as especificações do DNIT para base e sub-base e qual a energia ótima de compactação o solo estabilizava para uso em base e sub-base. Depois desta determinação foi feita a incorporação da cinza ao traço escolhido.

Foram moldados os traços com os teores de 0%, 3,0%, 6,0% e 9,0% de cimento adicionado em substituição ao solo e com as umidades obtidas a partir das curvas de compactação de cada traço. A cura foi do material foi aos 28 dias para ruptura dos corpos de prova. Para cada teor foram moldados 3 cp's, resultando em 36 cp's no total nesta fase.

Foram analisadas três energias e quatro traços, sendo 3 corpos de prova para cada traço anotados dados altura, diâmetro e peso dos cp's além da sua resistência à compressão.

A Figura 3.10 mostra a cura úmida dos corpos de prova sendo feita dentro de sacos plásticos mantendo a temperatura ideal.



Figura 3.10 – Corpos de prova armazenados em sacos para a cura úmida.

3.2.2.2 Estudo do comportamento mecânico da mistura SCCLE

Após o rompimento dos corpos de prova no ensaio de compressão simples com o solo-cimento, foi obtido o teor mínimo de cimento e a energia ótima de compactação para estabilização do solo. Feito isto, a partir da mistura ideal, foi adicionado cinza de lodo em proporções pré-definidas para o ensaio de compressão das misturas solo-cimento-cinza de lodo.

3.2.2.2.1 Ensaio de compressão simples do SCCLE

As análises da compressão simples foram feitas com os traços de (solo-cimento-cinza de lodo), a partir do traço da mistura SC com o teor de cimento e energia ótima de compactação. Teve adição de cinza nos teores de (5%, 10%, 20% e 30%), para cada uma das combinações foram moldados 3 corpos de prova, resultando mais 12 cp's. As adições de cinza foram em porcentagens feitas em substituição à massa de solo seco.

O esquema abaixo, na Tabela 3.2, mostra as quantidades de corpos de prova que foram moldados para cada traço e energia nos ensaios: compactação, CBR e compressão simples para todas as misturas.

A sigla SC significa solo-cimento, e os percentuais no caso da mistura S97C3 é composta por (97% de solo + 3% de cimento). A sigla SCCLE, significa solo-cimento-cinza de lodo de esgoto e segue a mesma nomenclatura dos percentuais.

Tabela 3.2 – Relação da quantidade de corpos de prova e traços por ensaio com as composições dos materiais.

ENERGIA	TRAÇO (Nº)	COMPACTAÇÃO (un./energia)	CBR (unid.)	COMPRESSÃO SIMPLES (un./energia)
Primeira parte – 3ª etapa				
Normal, intermediária e modificada	(T ₁) Solo	3	5	3
	(T ₂) S97C3	3	--	3
	(T ₃) S94C6	3	--	3
	(T ₄) S91C9	3	--	3
Segunda parte – 3ª etapa				
Energia ótima escolhida	(T ₅) SC(%ótimo)CLE5	--	--	3
	(T ₆) S%C(%ótimo)CLE10	--	--	3
	(T ₇) S%C(%ótimo)CLE20	--	--	3
	(T ₈) S%C(%ótimo)CLE30	--	--	3
TOTAL	8 traços	36	5	48

Legenda:

- T₁ – (100% do Solo);
- T₂ – (97% do solo + 3% de cimento);
- T₃ – (94% do solo + 6% de cimento);
- T₄ – (91% do solo + 9% de cimento).

Os traços T5, T6, T7 e T8 foram definidos a partir do estudo de dosagem de cimento para estabilização do solo e adição da cinza.

- S%C% (Solo-cimento);
- S%C%CLE% (Solo-cimento-cinza de lodo)

Abaixo, segue a Tabela 3.3 com a relação das normas que foram utilizadas para os ensaios de caracterização do solo estudado. Na Tabela 3.4 é mostrado os ensaios que foram feitos para caracterização mecânica das misturas.

Tabela 3.3 – Relação das normas para ensaio de caracterização do solo.

Ensaio	Norma
Análise Granulométrica por sedimentação	NBR 7181 - (1984)
Massa específica real	NBR 6508 - (1984)
Massa específica real cimento e cinza	NBR 6474 - (1984)
Limite de Liquidez	NBR 6459 - (1984)
Limite de Plasticidade	NBR 7180 - (1984)

Tabela 3.4 – Relação das normas para ensaio de caracterização mecânica das misturas.

Ensaio	Norma
Preparação de amostras para compactação	NBR 7182 - (1986)
Compactação Solo cimento	NBR 12023 – (1992)
Índice de Suporte Califórnia – ISC – CBR	NBR 9895 - (1987)
Preparação de amostras para compressão simples	NBR 12024 - (1992)
Compressão simples	NBR 12025 - (1990)

CAPÍTULO 4

Apresentação e Análise dos Resultados

Neste capítulo é feita a apresentação e análise dos resultados obtidos na pesquisa. Inicialmente apresentam-se a caracterização física e química dos materiais empregados na pesquisa e em seguida os resultados do estudo do comportamento mecânico do solo, do solo-cimento e das misturas solo-cimento-cinza.

4.1 Caracterização física e química dos materiais

4.1.1 Massa específica dos sólidos

Os resultados obtidos nos ensaios de massa específica dos sólidos dos materiais estudados encontram-se na Tabela 4.1. O valor obtido para o solo é inteiramente compatível com o esperado para solos ricos em quartzo. Em relação ao cimento, o valor obtido também corresponde ao esperado, conforme relatado por Alves (1999) que obteve valores em torno de $3,15 \text{ g/cm}^3$. No caso da cinza do lodo, o resultado obtido ficou um pouco abaixo do mencionado na literatura por Geyer (2001) que obteve $2,65 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 4.1 – Massa específica real dos materiais.

Material	Massa específica real (g/cm^3)
Solo	2,65
Cimento CP II – Z - 32	3,10
Cinza de lodo de esgoto	2,52
97 % solo + 3% cimento	2,66
94% solo + 6% cimento	2,68
91% solo + 9% cimento	2,69
86% solo + 9% cimento + 5% cinza de lodo	2,68
81% solo + 9% cimento + 10% cinza de lodo	2,68

Continuação Tabela 4.1 – Massa específica real dos materiais.

Material	Massa específica real (g/cm³)
71% solo + 9% cimento + 20% cinza de lodo	2,66
61% solo + 9% cimento + 30% cinza de lodo	2,65

4.1.2 Volatilidade do lodo calcinado

O lodo foi colocado em mufla após previa secagem ao ar. Ao ser colocado durante duas horas a uma temperatura de 550°C parte do material é volatilizada e outra parte se transforma em cinza (lodo calcinado). A Tabela 4.2 apresenta os teores de volatilização para o lodo utilizado na pesquisa após sua calcinação. A porcentagem de resíduo gerado foi em torno de 35%. Este valor está próximo ao obtido por Geyer (2001) que obteve 32%.

Tabela 4.2 – Resíduo obtido após calcinação a 550°C de lodo.

Amostras	(1)	(2)
Lodo bruto (g)	149,59	178,80
Resíduo gerado (g)	52,37	60,79
Porcentagem volatilizada (%)	64,99	66,00
Teor de resíduo gerado (%)	35,01	34,00

4.1.3 Limites de Consistência

Os resultados dos ensaios de Limite de Liquidez e de Plasticidade do solo e da cinza são apresentados na Tabela 4.3. O solo apresentou um índice de plasticidade médio (entre 10 e 15) e a cinza apresentou comportamento não plástico. Esse foi o mesmo comportamento obtido no estudo de cinza realizado por Geyer et al. (1998).

Tabela 4.3 – Limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade solo.

Material	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo	40,9	30,40	10,5
Cinza	Não plástico		

4.1.4 Análise Granulométrica

A Figura 4.1 apresenta a curva granulométrica do solo usado no estudo. As frações granulométricas obtidas a partir da curva estão mostradas na Tabela 4.4. Os resultados mostram que em termos granulométricos o solo pode ser classificado como um silte areno-argiloso.

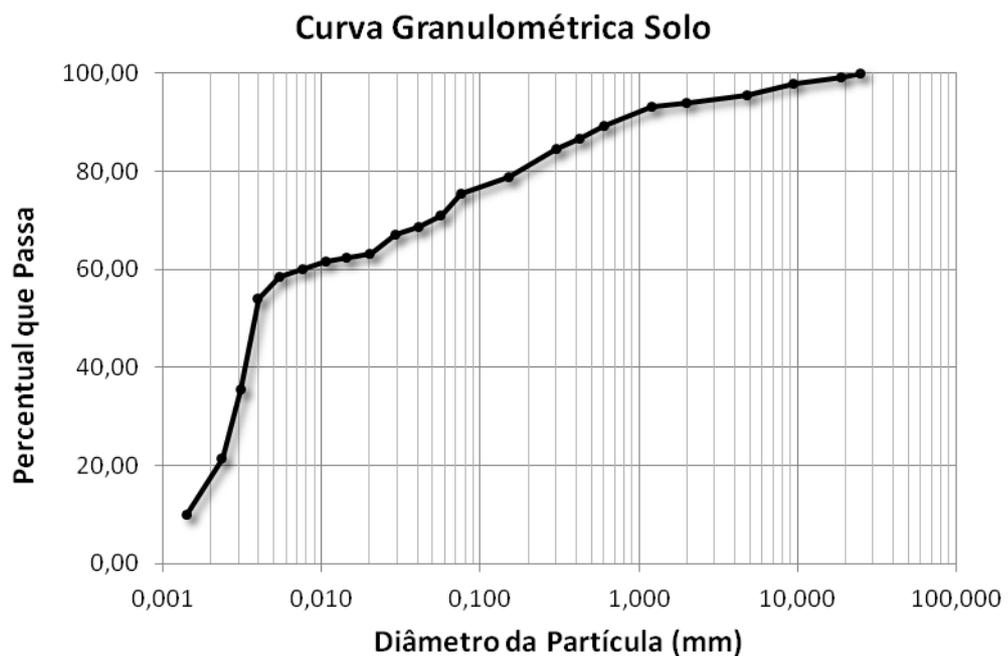


Figura 4.1 – Análise Granulométrica do solo.

Tabela 4.4 – Porcentagens ensaio granulométrico.

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia			Pedregulho
			Fina (%)	Média (%)	Grossa (%)	(%)
Solo	22,0	39,0	20,0	10,0	6,0	3,0

4.1.5 Classificação do solo quanto a pavimentação

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) o material pode ser classificado como ML, ou seja, silte de baixa compressibilidade. Pela classificação da HRB, (Highway Research Board) o solo é classificado como A-4, com índice de grupo igual a 5,3.

4.1.6 Análise química e Risco Ambiental

Os resultados da composição mineralógica das amostras de solo e lodo de esgoto estão apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3, respectivamente. Foram encontrados minerais na forma de óxidos, tais como óxido de silício, aluminatos e ferro aluminatos tanto no solo quanto na cinza de lodo analisadas.

No lodo fresco foram identificados minerais tais como quartzo, caulinita e ferro aluminato. Esses resultados são idênticos aos obtidos por Medeiros (2006). Duarte (2008) encontrou a presença de quartzo, caulinita e anortita.

No solo foram identificadas como principais espécies minerais; quartzo, caulinita e aluminatos, espécies compatíveis com a natureza laterítica dos solos presentes na região estudada.

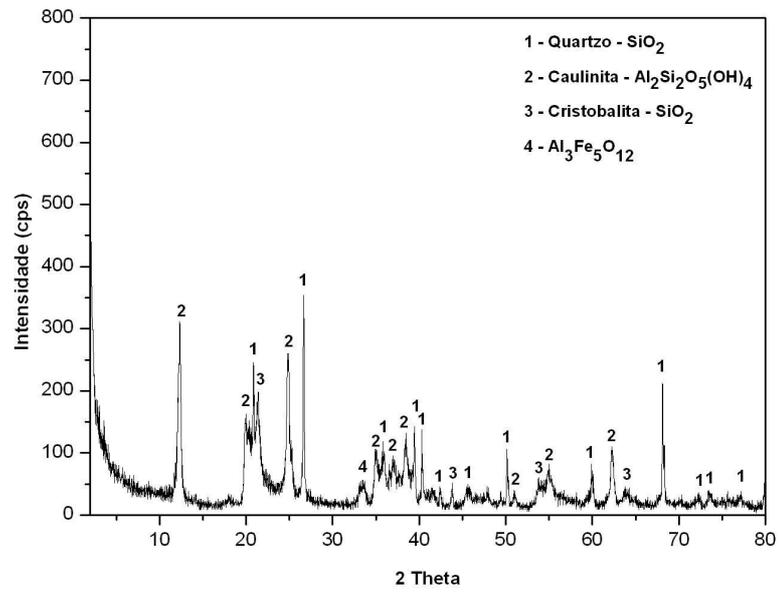


Figura 4.2 – Difratoograma apresentando as fases identificadas na amostra de solo da jazida próximo à Parnamirim/RN.

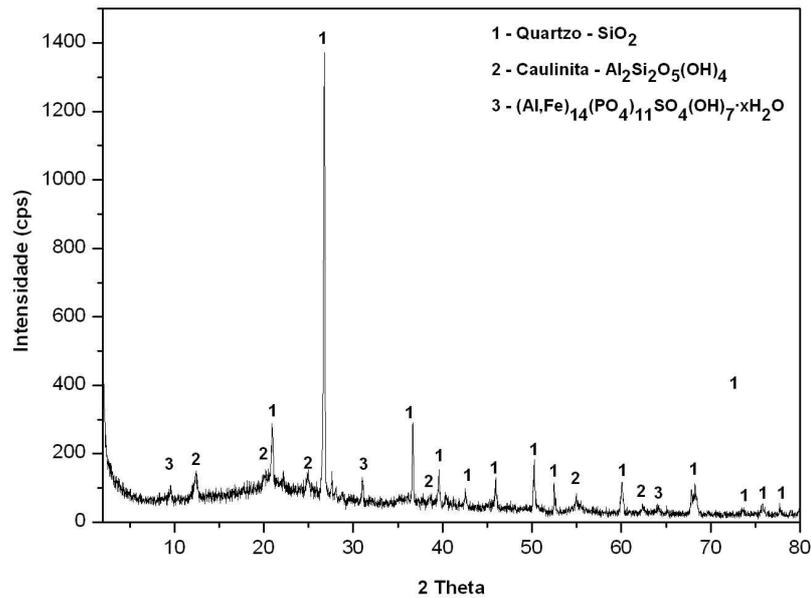


Figura 4.3 – Difratoograma apresentando as fases identificadas na amostra do lodo de esgoto da lagoa anaeróbia próximo ao km 6 da BR-226.

A análise química semiquantitativa das amostras de solo e lodo de esgoto por fluorescência de raios-X (FRX) foram realizadas no CTGás-ER Natal/RN. Os resultados das análises do solo e do lodo estão apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente.

Tabela 4.5 – Análise semiquantitativa da amostra de solo.

Solo jazida de Parnamirim - Óxidos (%)								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	ZrO ₂	K ₂ O	SnO ₂	SO ₃	Cr ₂ O ₃
36,26	32,31	27,86	2,88	0,22	0,16	0,11	0,11	0,09

Foi encontrado em maior percentual o óxido de silício na amostra de solo analisada seguida de óxido de ferro e alumínio. Pode-se observar que amostra é constituída basicamente de óxidos desses minerais, sílica, ferro e alumínio com um percentual de 96,43%. A presença de óxidos de ferro e alumínio indicam que o solo é laterítico.

Tabela 4.6 – Análise semiquantitativa da amostra de lodo.

Lodo km-06 – Óxidos (%)							
SiO₂	Fe₂O₃	Al₂O₃	CaO	SO₃	P₂O₅	TiO₂	SnO₂
30,74	19,55	14,51	10,97	7,79	4,75	3,32	2,37
ZnO	MgO	K₂O	CuO	ZrO₂	MnO	SrO	NiO
1,88	1,50	1,45	0,53	0,38	0,12	0,09	0,05

Na análise química quantitativa do lodo há uma grande presença dos minerais presentes no solo, com uma maior presença de sílica, óxidos de ferro e alumínio com um percentual de 64,80%. A presença destes óxidos está associada a espécies arrastadas pelo sistema de tratamento de esgoto, onde a presença de quartzo foi identificada na análise mineralógica.

Duarte (2008) obteve teores próximos aos encontrados na pesquisa, com 63,03% dos três primeiros componentes, quartzo, óxido de ferro e óxido de alumínio. Medeiros, (2006) obteve também um percentual dos óxidos acima citados próximo ao da pesquisa com 65,71%.

Os resultados das análises dos extratos lixiviado e solubilizado de acordo com as normas citadas indicam que o lodo in natura é classificado como um resíduo Classe II-A (não inerte e não perigoso).

4.2 Ensaios de caracterização mecânica do Solo e Solo-Cimento (SC)

4.2.1 Ensaio de Compactação

Os resultados das curvas do solo e das misturas solo-cimento são mostrados nas Figuras 4.4 a 4.7. Em cada uma das figuras são apresentadas três curvas de compactação, correspondendo às energias normal, intermediária e modificada. A Figura 4.4 corresponde ao estudo do solo puro, enquanto que as Figuras 4.5 a 4.7 se referem as misturas de solo-cimento, com teores de cimento de 3, 6 e 9%,

respectivamente. A Tabela 4.7 mostra o resumo dos resultados dos ensaios com os dados de teor de umidade ótimo ($w_{ót}$) e massa específica seca máxima ($\rho_{d máx}$).

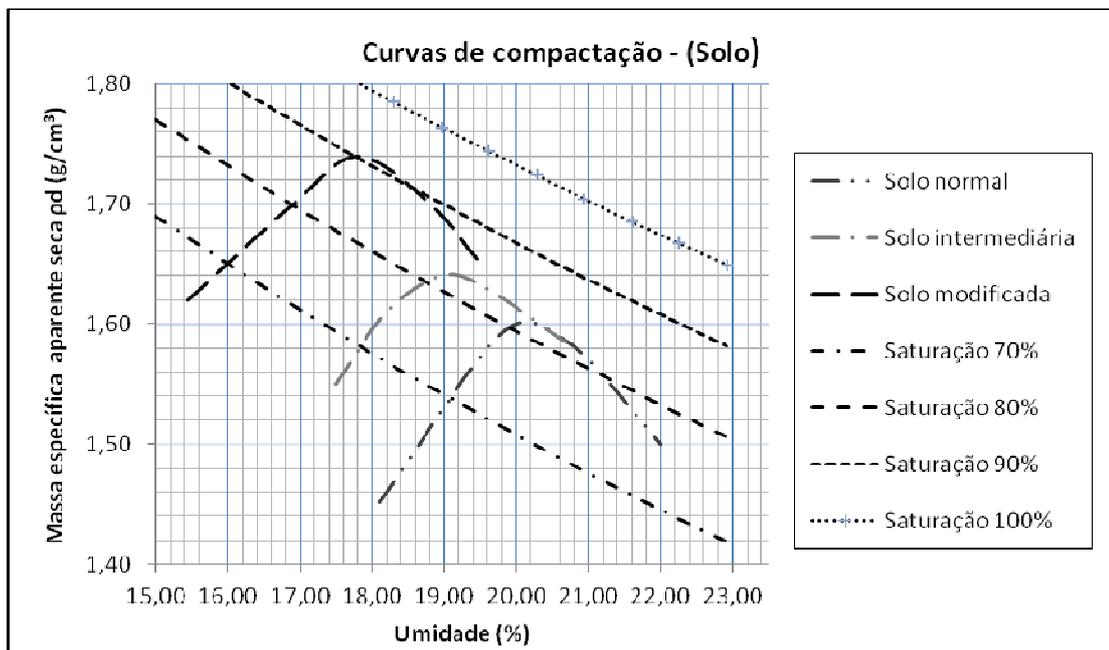


Figura 4.4 – Curvas de compactação Solo.

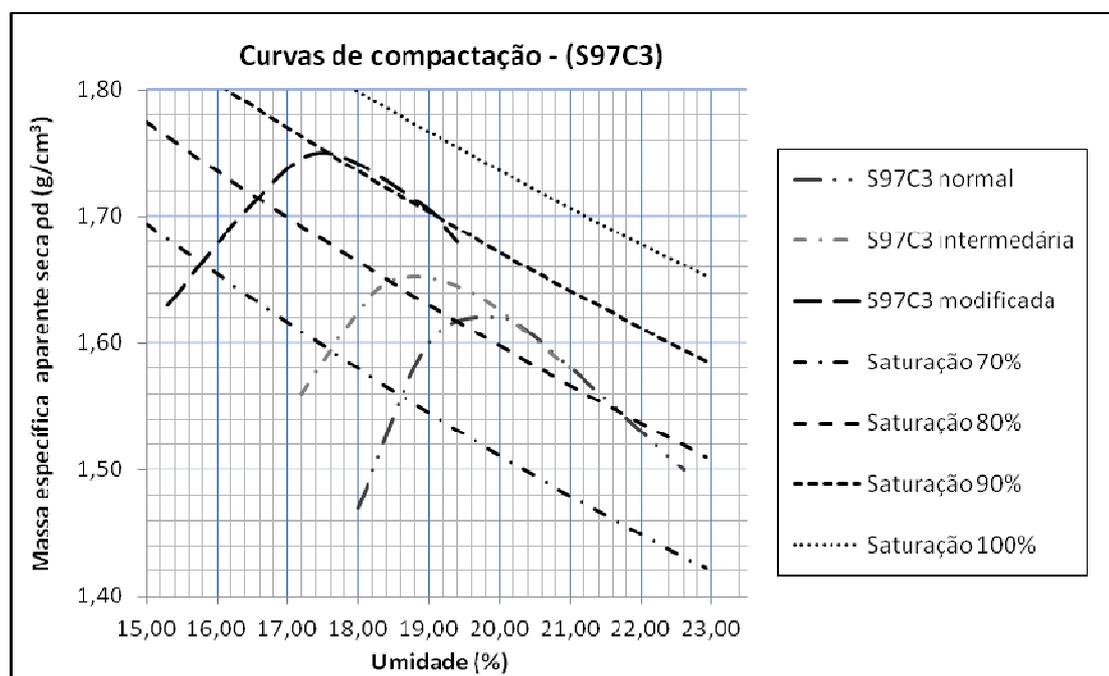


Figura 4.5 – Curvas de compactação S97C3.

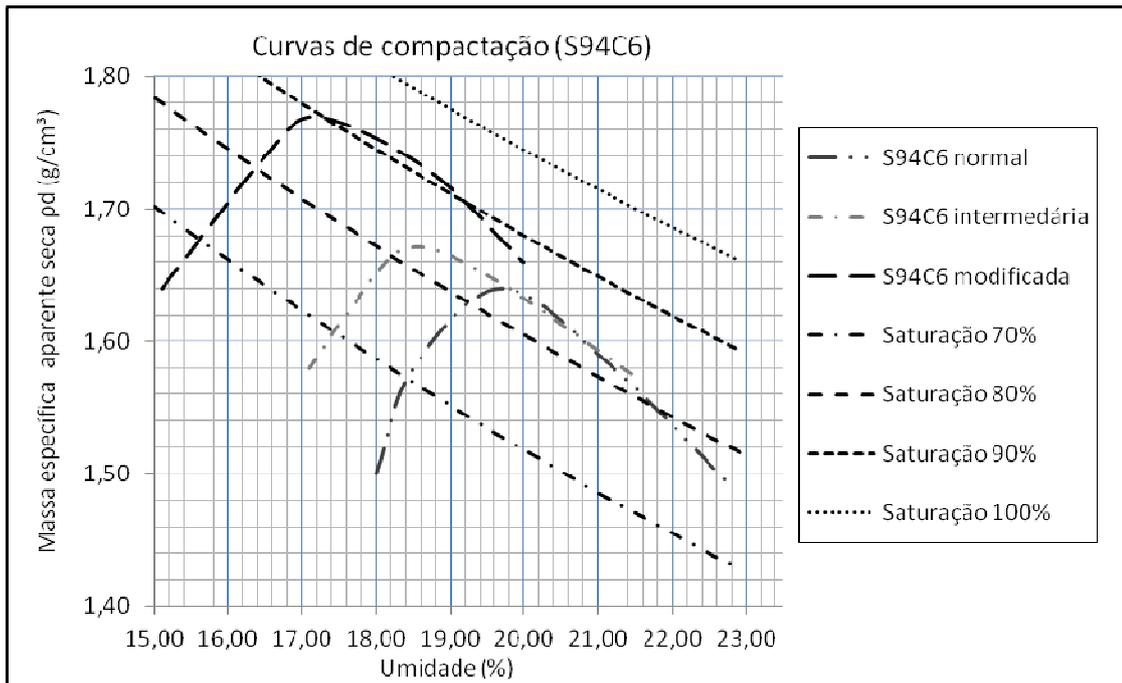


Figura 4.6 – Curvas de compactação S94C6.

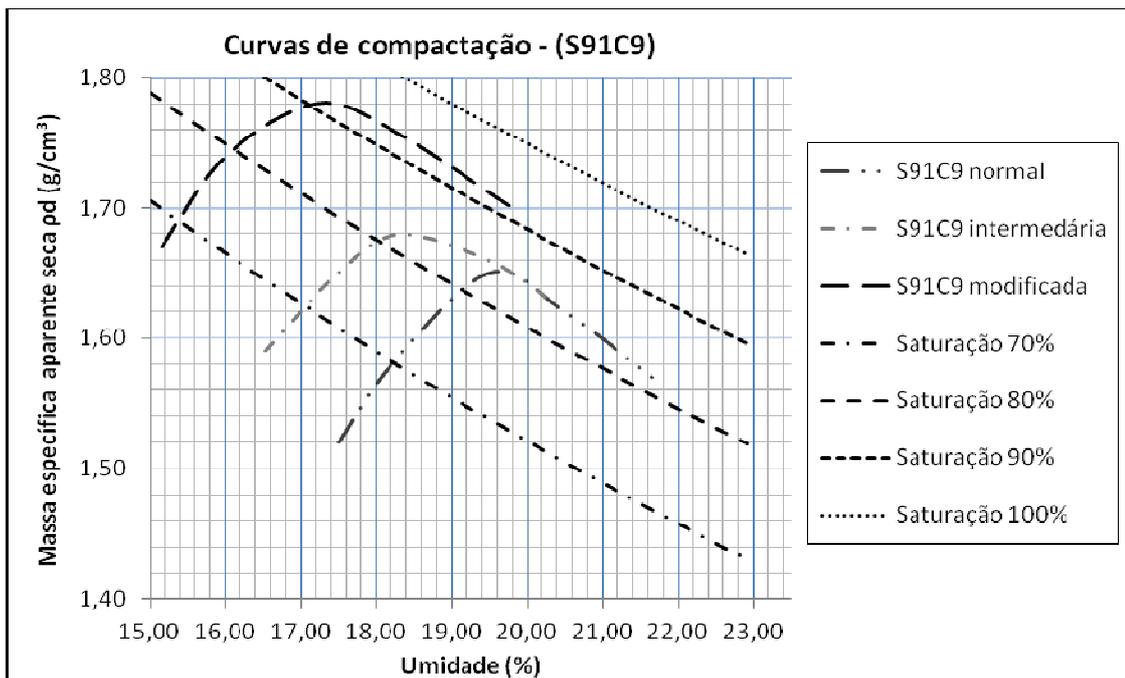


Figura 4.7 – Curvas de compactação S91C9.

Pode-se observar a partir das Figuras 4.4 a 4.7 que conforme há o aumento da energia de compactação as curvas têm um deslocamento para esquerda e para

cima, ou seja, aumenta massa específica seca máxima e diminui o teor de umidade ótimo, como era de se esperar.

Vendruscolo (1996) realizou ensaios de compactação com o solo natural e com o solo com adição de cimento, nas energias normal, intermediária e modificada e obteve resultados em similares aos apresentados nas Figuras 4.4 a 4.7, constatando que com o aumento da energia de compactação há um aumento da densidade e uma redução do teor de umidade ótima.

Tabela 4.7 – Tabela umidade ótima e massa específica máxima seca por traço e energia de compactação

Misturas solo-cimento			
ENERGIA	TRAÇO	$h_{ot.}$ (%)	$\rho_{d\ max}$ (g/cm ³)
Normal	T ₁	20,75	1,58
	T ₂	20,00	1,62
	T ₃	19,70	1,64
	T ₄	19,50	1,65
Intermediária	T ₁	18,97	1,64
	T ₂	18,50	1,65
	T ₃	18,40	1,67
	T ₄	18,30	1,68
Modificada	T ₁	17,80	1,74
	T ₂	17,50	1,75
	T ₃	17,20	1,77
	T ₄	17,20	1,78

Onde:

- T₁ – (100% do Solo);
- T₂ – (97% do solo + 3% de cimento), S97C3;

- T₃ – (94% do solo + 6% de cimento), S94C6;
- T₄ – (91% do solo + 9% de cimento), S91C9.

A partir das curvas de compactação do solo-cimento das figuras 4.5, 4.6 e 4.7 e dos dados apresentados na Tabela 4.7 pode-se observar que para uma dada energia de compactação, a massa específica seca máxima aumenta com o aumento do teor de cimento. Esse fato se deve ao cimento ter um maior valor de massa específica em relação ao solo. Resultados semelhantes foram relatados por Silva *et. al.* (2011) no estudo de compactação de uma areia silto-argilosa da cidade de Mandaguaçu/PR e de uma areia argilosa da cidade de Maringá/PR.

4.2.2 Ensaio CBR do solo

A Figura 4.8 apresenta a variação do CBR do solo puro com o teor de umidade de moldagem do corpo de prova. A Tabela 4.8 mostra a variação dos valores de CBR e expansão com a variação do teor de umidade do solo. A Tabela 4.9 apresenta em resumo os valores de CBR mínimos exigidos e expansão máxima permitida para solos a serem aplicados em camada de base e sub-base de pavimentos, conforme especificado pelo DNIT.

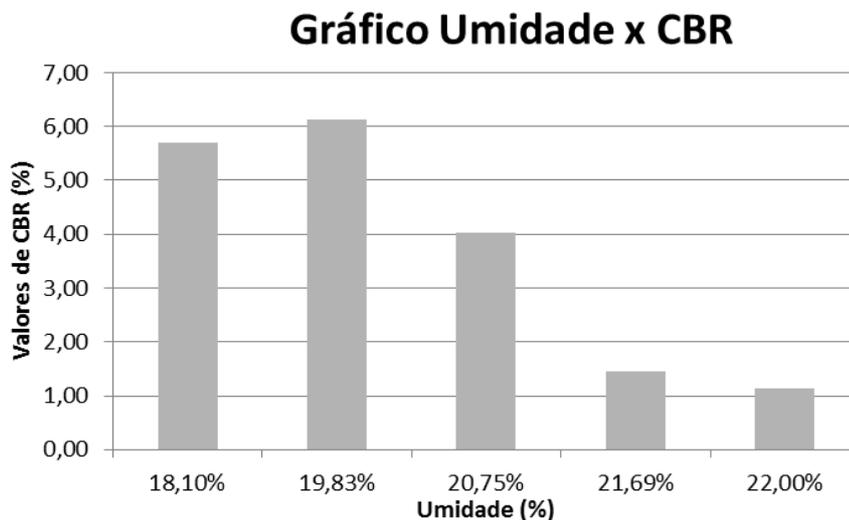


Figura 4.8 – Valores de CBR energia normal nas várias umidades do ensaio de compactação do solo.

Tabela 4.8 – Variação do CBR e da expansão com o teor de umidade.

Solo – Energia Normal					
Umidade (%)	18,10	19,83	20,75	21,69	22,00
CBR (%)	5,70	6,13	4,03	1,45	1,13
Expansão (%)	0,09	0,02	0,02	0,01	0,05

Tabela 4.9 – Valores de CBR mínimos aceitáveis e expansões máximas para base e sub-base para pavimentos de grande tráfego.

Camadas	CBR mínimo camadas	Expansão máxima
SUB-BASE	≥20%	≤1,0%
BASE	≥80%	≤0,5%

Analisando-se a Figura 4.8 e as Tabelas 4.8 e 4.9 a partir dos dados da verifica-se que o solo atende às exigências para uso em base e sub-base de pavimentos quanto à expansão, mas não quanto ao CBR mínimo exigido. Assim, o uso desse solo como material de construção de camadas de pavimentos só é possível através da estabilização.

4.2.3 Ensaio de Compressão Simples Solo e SC

Após o ensaio de CBR, no qual o solo não detém as propriedades necessárias para uso em pavimentos foi feito em seguida o estudo da compressão simples do solo usando os dados das curvas de compactação obtidas. Os traços que foram moldados estão listados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Traços utilizados para o ensaio de compressão simples nas misturas de solo-cimento.

Energia	Traço	Nomenclatura	Material (%)		
			Solo	Cimento	Cinza
Normal, Intermediária e Modificada	T ₁	S100	100	--	--
	T ₂	S97C3	97	3	--
	T ₃	S94C6	94	6	--
	T ₄	S91C9	91	9	--

A Tabela 4.11 mostra os valores de resistência à compressão em (kgf/cm²) e a Tabela 4.12 são apresentadas as características de moldagem dos corpos de prova (massa específica e teor de umidade). Os resultados dos ensaios são apresentados graficamente nas Figuras 4.9 e 4.10.

Os resultados dos ensaios mostram que ocorre um aumento da resistência com o aumento do teor de cimento para as três energias de compactação. Para um dado teor de cimento, a resistência aumenta com a energia de compactação.

Houve aumento na massa específica dos corpos de prova com acréscimo de cimento e incremento de energia de compactação como pode ser observado na Tabela 4.12.

De acordo com as especificações do DNIT, a estabilização de solo com cimento deve fornecer uma resistência mínima de 21 kgf/cm². Assim, com base nos dados da Tabela 4.11 e da Figura 4.9, o valor mínimo não é atingido com a energia normal; com a energia intermediária a resistência mínima especificada só é atingida com teor de cimento de 9% e com a energia modificada os traços já apresentam a resistência com 3% de cimento.

Tabela 4.11 – Resistência à compressão simples dos traços solo-cimento.

Energia Normal				
Traço	Resistência (kgf/cm²)			Desvio Padrão
	Mínima	Máxima	Média	
T ₁ (S100)	1,85	1,97	1,91	0,06
T ₂ (S97C3)	5,22	6,11	5,68	0,45
T ₃ (S94C6)	14,63	15,91	15,31	0,64
T ₄ (S91C9)	18,96	19,72	19,55	0,53
Energia Intermediária				
Traço	Resistência (kgf/cm²)			Desvio Padrão
	Mínima	Máxima	Média	
T ₁ (S100)	8,27	8,65	8,48	0,15
T ₂ (S97C3)	10,82	12,09	11,45	0,64
T ₃ (S94C6)	19,21	20,17	19,83	0,54
T ₄ (S91C9)	22,27	22,91	22,61	0,32
Energia Modificada				
Traço	Resistência (kgf/cm²)			Desvio Padrão
	Mínima	Máxima	Média	
T ₁ (S100)	9,54	10,18	9,88	0,32
T ₂ (S97C3)	21,00	23,03	21,89	1,04
T ₃ (S94C6)	25,32	26,72	26,04	0,70
T ₄ (S91C9)	38,18	39,45	38,81	0,64

Tabela 4.12 – Valores médios de massa específica seca e teor de umidade dos corpos de prova dos ensaios de RCS.

Parâmetros		Traços			
		Solo, Solo-cimento			
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Energia Normal					
ρ_d (g/cm ³)	Média	1,57	1,61	1,63	1,64
w (%)		18,30%	19,10%	20,10%	20,10%
Energia Intermediária					
ρ_d (g/cm ³)	Média	1,64	1,65	1,67	1,68
w (%)		19,30%	18,70%	18,40%	18,40%
Energia Modificada					
ρ_d (g/cm ³)	Média	1,74	1,75	1,77	1,78
w (%)		18,20%	18,20%	17,50%	18,20%

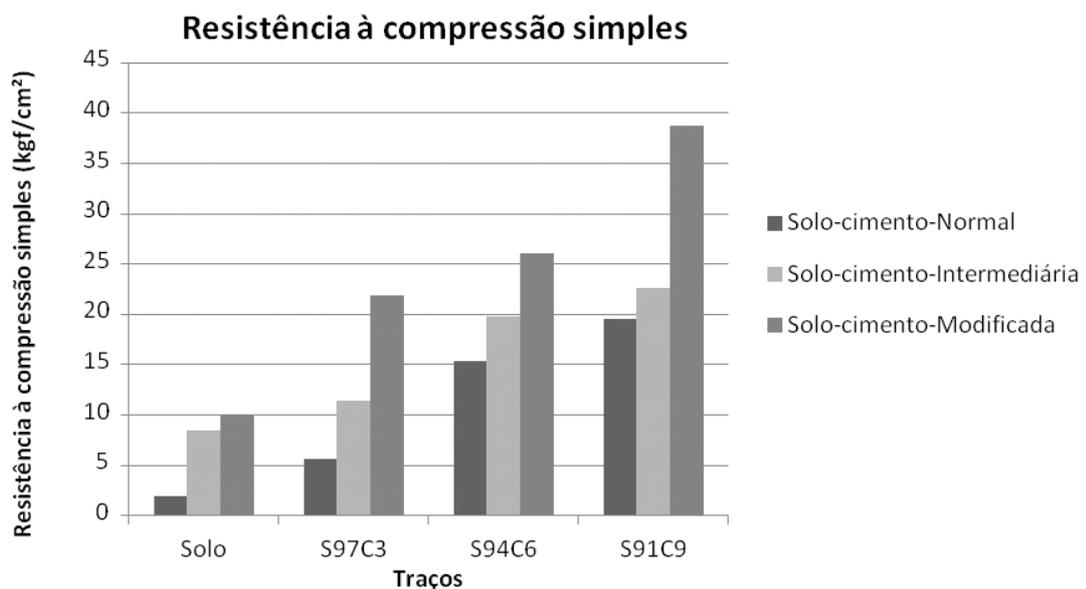


Figura 4.9 – Resistência à compressão simples solo-cimento por traço e energia no ensaio de RCS.

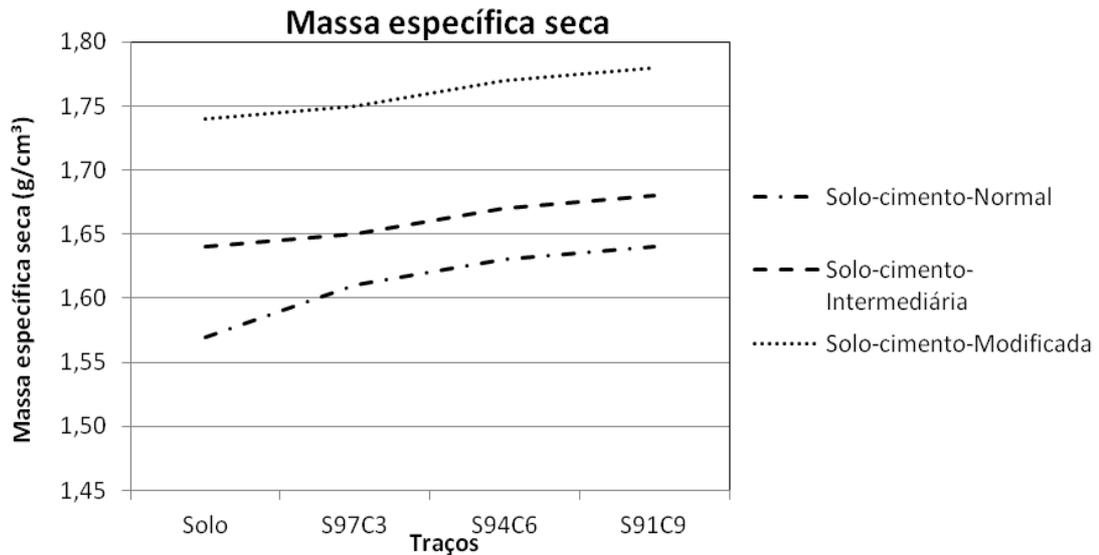


Figura 4.10 – Variação da massa específica nos traços e energias do ensaio de RCS.

4.2.4 Ensaios de caracterização mecânica das misturas Solo-Cimento-Cinza de Lodo (SCCLE)

4.2.4.1 Ensaio de compressão simples do SCCLE

Para o estudo da adição de cinza de lodo de esgoto a mistura de solo-cimento, o traço escolhido após os ensaios de compressão foi o T₄I, (91% de solo + 9% cimento, moldado na energia intermediária). Esse traço apresentou resistência de 22,61 kgf/cm², o qual atende ao valor mínimo de referência (21 kgf/cm²) definido pela DNER – ES – 305/97, para uso como material de base e sub-base de pavimentos.

Ao traço T₄ foram adicionadas quantidades de cinza de lodo nos teores de 5; 10; 20 e 30% em peso de sólidos em substituição ao solo. Foram então definidos os traços T₅ a T₈, conforme indicado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Traços em para o ensaio de compressão simples SCCLE.

Energia	Traço	Nomenclatura	Material (%)		
			Solo	Cimento	Cinza
Intermediária	T ₅	S86C9CLE5	86	9	5
	T ₆	S81C9CLE10	81	9	10
	T ₇	S71C9CLE20	71	9	20
	T ₈	S61C9CLE30	61	9	30

O teor de umidade usado para a compactação dos corpos de prova dos traços acima relacionados foi o do traço T₄l obtido a partir do ensaio de compactação.

Os resultados dos ensaios de RCS nas misturas de SCCLE são mostrados na Tabela 4.14 e na Figura 4.11. Os valores das massas específicas obtidas nos corpos de prova moldados para os ensaios de RCS são mostrados na Tabela 4.15 e na Figura 4.12.

Tabela 4.14 – Resistência à compressão simples dos traços solo-cimento-cinza de lodo de esgoto.

Parâmetros		Traços			
		Solo-cimento-cinza			
		T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
Energia Intermediária					
Resistência (kgf/cm²)	Média	24,22	25,20	28,46	27,21

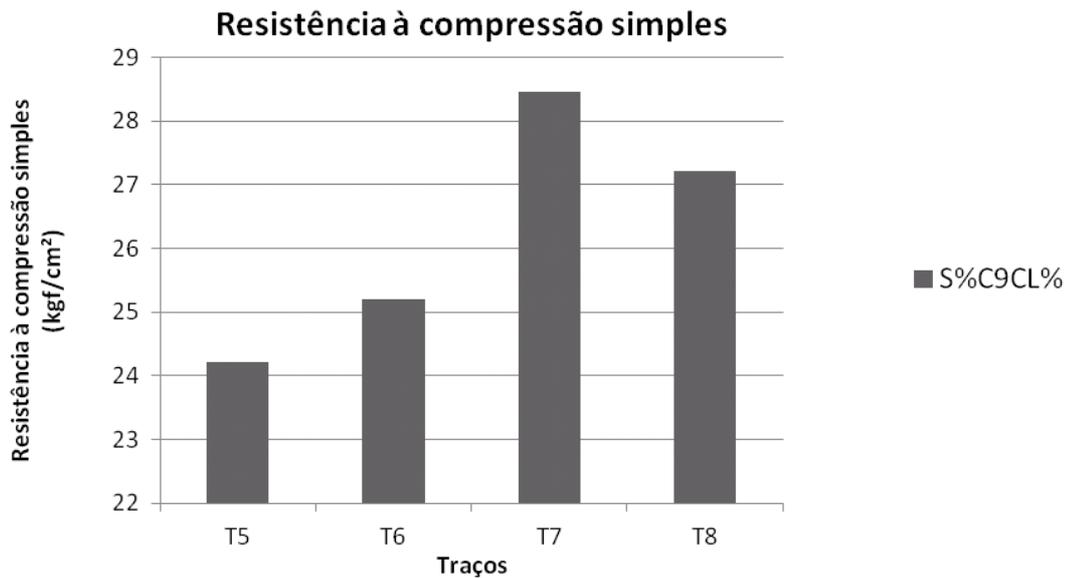


Figura 4.11 – Resistência à compressão simples solo-cimento-cinza por traço.

A partir da comparação dos comportamentos da resistência à compressão simples mostrados na Figura 4.11 em relação ao da Figura 4.9 é possível afirmar que houve aumento de resistência para todos os teores de cinza incorporados a mistura solo-cimento do traço T₄l. A Figura 4.11 e a Tabela 4.14 mostram que a maior resistência foi apresentada no traço T₇l com um aumento de 25,87% em relação ao traço escolhido.

Resultados semelhantes foram obtidos por Monzó *et al.* (1996) que concluiu que ao substituir 15% de cimento Portland por cinza a resistência à tração e à compressão da mistura teve um ganho. O autor atribuiu o ganho às propriedades pozolânicas da cinza de lodo.

Tabela 4.15 – Massa específica e umidade média dos traços solo-cimento-cinza do ensaio de RCS.

Parâmetros		Traços			
		Solo-cimento-cinza			
		T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
Energia Intermediária					
pd (g/cm³)	Média	1,62	1,59	1,55	1,48
h (%)	Média	18,30%	19,70%	18,30%	19,90%

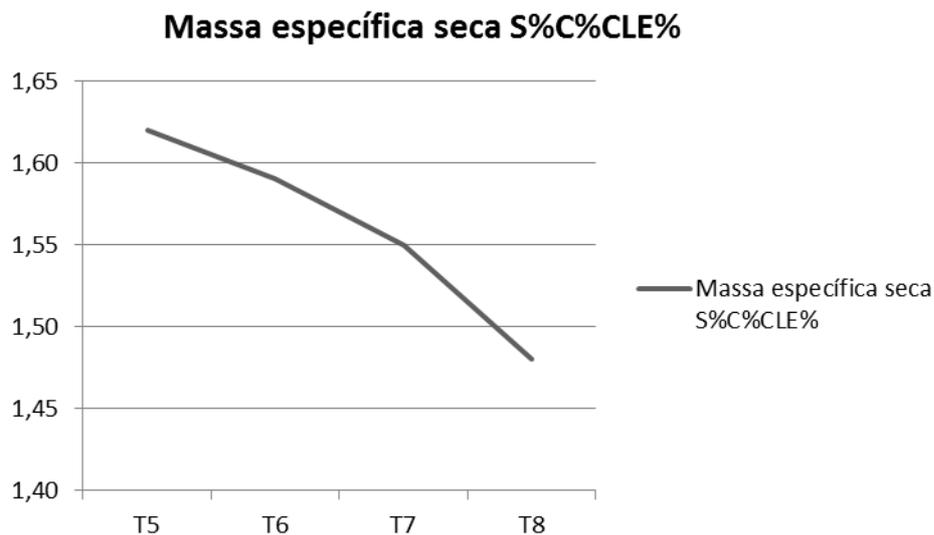


Figura 4.12 – Variação da massa específica seca dos traços SC9CLE% no ensaio de RCS.

A Figura 4.12 indica que há decréscimo na massa específica dos corpos de prova dos traços com o aumento do teor de cinza de lodo. Pode-se atribuir este decréscimo na massa específica ao fato da cinza de lodo apresentar massa específica inferior do solo.

A análise dos resultados da pesquisa mostra que se pode incorporar até 30% de cinza de lodo esgoto a mistura de solo-cimento do traço T₄ (S91C9) compactado na energia intermediária com ganho de resistência em relação ao solo-cimento. O

ganho é maior para a adição de 20% de cinza. O estudo mostrou que é possível a adição de até 30% (valor máximo analisado) sem prejuízo de resistência.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Recomendações

Neste capítulo são feitas as conclusões sobre a pesquisa e as recomendações para futuras pesquisas relacionadas com o tema. Baseando-se nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O solo estudado não apresentou características mecânicas que lhe credenciassem ao uso como base e sub-base, verificado a partir do ensaio de CBR. A resistência à compressão simples também não foi atendida, mas quanto à expansão, os resultados foram satisfatórios.
- Observa-se aumento na resistência à compressão simples em todos os traços com adição de cimento, sendo o melhor resultado para o traço T₄ na energia modificada.
- Nota-se incremento da RCS em todos os traços contendo a cinza, sendo mais satisfatório o traço T_{7l} com um ganho de 25,87% de resistência em relação ao traço T_{4l} de referência.
- Observa-se que com acréscimo do teor de cinza adicionado ao traço T_{4l} há uma diminuição da massa específica. Este comportamento é atribuído ao fato de que a massa específica da cinza ser inferior ao do solo e a do cimento, permitindo uma redução do peso da mistura em um mesmo volume. Houve uma redução 11,90% do traço T_{4l} do solo para o traço T_{8l} com (61% de solo, 9% de cimento e 30% de cinza de lodo).
- O ganho na resistência pode ser atribuído ao fato da cinza ter características pozolânicas, fato evidenciado por outras pesquisas como a de Geyer (2001).
- É possível ter uma economia quanto ao uso do cimento para estabilizar o solo, uma vez que há um ganho de resistência da mistura solo-cimento com a adição de cinza de lodo de esgoto, mas para completa afirmação são necessários estudos mais detalhados com vários teores de cinza e de cimento, e levar em conta os gastos com a queima do lodo, avaliando se realmente existe a viabilidade para o seu uso.

Em futuros estudos recomenda-se que:

- Seja feito um estudo com uma maior variação de teores de cinza e cimento nas três energias para conhecimento mais detalhado do comportamento mecânico e físico das misturas;
- Estudar mais detalhadamente as curvas de compactação das misturas contendo teores de cinza para determinação da umidade ótima e massa específica máxima seca;
- Buscar um traço ótimo para a estabilização com o uso mínimo de cimento e com adição de cinza;
- Estudo com outros lodos, tanto de lagoa de estabilização quanto de ETE's de forma a conhecer estas variações que ocorrem devido à origem do lodo o que influência nos resultados de caracterização das misturas.

CAPÍTULO 6

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Estudo Técnico 35: Dosagem das misturas de solo-cimento: Normas de dosagem. 3. ed. São Paulo, SP, 51 p, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Estudo Técnico 35: Dosagem das misturas de solo-cimento: Normas de dosagem. 3. ed. São Paulo, SP, 51 p, 1986.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo-Cimento - Ensaio de compactação, NBR 12023, Rio de Janeiro, 1992.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo-Cimento – Índice de Suporte Califórnia, NBR 9895, Rio de Janeiro, 1987.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos, NBR 12024, Rio de Janeiro, 1992.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndrico, NBR 12025, Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12253/90, Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento, Rio de Janeiro, 4p, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: solo: amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, RJ, 7 p, 1986a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459/84, Solo - Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, 6p, 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6474/84, Determinação da Massa específica real. Rio de Janeiro, 1984

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508/84, Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 8p, 1984d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180/84, Solo – Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, 3p, 1984c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181/84, Solo – Análise Granulométrica – Procedimento, Rio de Janeiro, 13p, 1984 a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo: ensaio de compactação: Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 10 p, 1986 b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 1004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, NBR 10005, Rio de Janeiro, 2004.

ACCA (AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION). Fly Ash Facts for Highway Engineers. Edição 4. 2003.

ACE PLAN – Areawide Sewage Sludge Treatment and Disposal Project. Japan Sewage Works Agency. 10p. Tokyo, 1990.

AL SAYED, M. H.; MADANY, I. M.; BUALI A. R. M. Use of sewage sludge ash in asphalt paving mixes in hot regions. In: Construction and Building Materials, vol. 9, p. 19 – 23, 1995.

ALLEMAN, J. E. & BERMAN, N. A. Constructive sludge management: Biobrick. Journal of Environmental Engineering, v.110, Nº. 2, April, 1984.

ALMEIDA, A., DINIS DE SOUZA, C., LOPES, M. L., Valorização de Escórias de incineração de resíduos sólidos urbanos em obras geotécnicas. Seminário Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. 2009.

ALMEIDA, I. R. Betões de alta resistência e durabilidade – composição e características. Lisboa, 1990. E40p. : Tese (Doutorado em Engenharia) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC – Portugal.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI COMMITTEE 212 – Guide for Use of Admixtures in Concrete. - Manual of Concrete Practice, par.I, 1985, p. 212.2R-1 – 212.2R- 13.

ANDREOLI, C V. & PERGONI, E. S. Gestão pública do uso agrícola do lodo de esgoto. In: BETTIOL, W. & CAMARGO, O. A. Impactos Ambientais do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna, São Paulo: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. 281 – 312p.

ANDREOLI, C. V. & FERNANDES, F. Aspectos Metodológicos. In: Reciclagem de Biossólidos: Transformando Problemas em Soluções. Curitiba. Sanepar, Finep, 1999. p. 21 - 35.

ANDREOLI, C. V. & FERNANDES, F. Aspectos Metodológicos. In: Reciclagem de Biossólidos: Transformando problemas em Soluções. Curitiba. Sanepar, Finep, 1999. P. 21 – 35.

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

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; LARA, A. I. de; FERNANDES, F. Reciclagem de Biossólidos: transformando problemas em soluções. Curitiba: SANEPAR; FINEP, 1999.

ATLAS, R. M. Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons: an environmental Perspective. Microbiological Reviews. p. 180 - 209, March. 1981.

BANCO NACIONAL DA HABITAÇÃO. Relatório anual. 1983. Rio de Janeiro, 1983. 30 p.

BEHAK, L. Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal. Dissertação (Mestrado em Engenharia) 171 p. Porto Alegre/RS, 2007.

- BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo. Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado. Rio de Janeiro: COPPE – UFRJ, 2004. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004, 135 p.
- BROSCH, C. D. Produção de Agregado Leve a partir do Lodo de Esgoto. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, 1975.
- CARNEIRO, Pedro Henrique. Efeito da adição de lodo ao inoculo reator anaeróbio hídrico sólido-líquido tratando fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. São Carlos: EESC, 2005. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- CARVALHO, P. C. T.; BARRAL, M. F. Aplicação de lodo de esgoto como fertilizante. Fertilizantes, São Paulo, v. 3, p. 1-4, 1981.
- CASSINI, S. T.; VAZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. Introdução. 1-9 p. In: CASSINI, S. T. (Coord). Digestão de resíduos orgânicos e aproveitamento do bio gás. 1. Ed. Rio de Janeiro: ABES/Rima, 2003. 210 p.
- CECCATTO, D. M. Avaliação da Utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concreto – propriedades mecânicas. Porto Alegre, 2003. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS - DNER – ES – 301/97. Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente 7p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS - DNER – ES – 301/97. Pavimentação – base de solo-cimento 10p.
- DUARTE, A. da C. L. Incorporação de lodo de esgoto na massa cerâmica para fabricação de tijolos maciços: uma alternativa para a disposição final de resíduo. Natal/RN, 2008. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

FARIAS, E. R. A utilização de Misturas Solos/Cinza Pesada na Pavimentação – Análise de Aspectos de Comportamento Mecânico e Ambiental. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. 121 p.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). User Guidelines for by product and Secondary Use Materials in Pavement Construction. FHWA-RD-97-148. 2008.

FEITOSA, Maria Célia Alves. Lodo de esgoto: Algumas aplicações em Engenharia/ Maria Célia Alves Feitosa, 2009. 120p.

FERNANDES, C. G. Caracterização Mecânica de agregados reciclados de resíduos da construção e da demolição para uso em pavimentação dos municípios do Rio de Janeiro e Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. RJ, 2004.

FERNANDES, F. Manual Prático para Compostagem de biossólidos. 1. Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 84 p.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V.; JÜRGENSEN, D. Produção e Características dos biossólidos. 17-25 p. In: ANDREOLI, C. V.; LARA A. I.(org.) Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999. 97 p.

FERREIRA. C. RIBEIRO A., OTTOSEN, L., Possible applications for municipal Solid waste fly ash. Journal of Hazardous Materials B96 p-201-216. 2003.

FONTES, C. M. A. 2008. Utilização das cinzas de lodo de esgoto e resíduo sólido em concretos de alto desempenho. Phd. Thesis. Federal University of Rio de Janeiro, Brazil.

FONTES, C. M. A. Potencialidades da Cinza de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos como material suplementar para a produção de concreto com cimento Portland. Rio de Janeiro, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

FREITAS, H. B. de. Misturas asfálticas de módulo elevado com uso de escória de aciaria como agregado – Dissertação de Mestrado, UFRJ, 2007.

GEYER, A. L. B., CONSOLI, N. C. e DAL MOLIN, D. C. – Recycling of sewage sludge from treatment plants of Porto Alegre city, Brazil, and its use as admixture in concrete. In: Challenges for concrete in the next millennium. Proceedings...Amsterdam, maio/1998.

GEYER, A. L. B., RECENA, F. P. e SCHURER, A. Caracterização dos Lodos de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários de Porto Alegre, CPGEC – UFRGS, 1995.

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

GOH, A. T. C., TAY, J. H., Municipal solo-waste incineration fly ash for geotechnical applications. Journal of Geotechnical Engineering, 119 (5), 811-825. 1993.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgotos. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. (Ed.) Lodo de esgotos; Tratamento e disposição final. Belo Horizonte; DESA-UFGM, 2001. P.159-259. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

INGLES, O. G., METCALF, J. B., soil stabilization: principles and practice. Butterworth-heinemannltd. 384 p. April 1973.

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

LEI Nº 9.605, Lei de Crimes Ambientais, 1998. Acessado em: WWW.Planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm, 10 de março de 2012.

LEITE, F. C. Comportamento Mecânico de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil em Camadas de Base e Sub-base de Pavimentos. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP, 2007.

LIEDI, B. B. et al. Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro, 2006.

LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. Estabilização dos solos II: técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1993. 32 p.

LIMA, E. P. C. et al. Estudo da termo resistência de ovos de helmintos, Coliformes termotolerantes e *Escherichia coli*. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005. Anais, Campo Grande/MS, 2005.

LOPES, L. E. S. Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de base de pavimentos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifca Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2011.

MALHORTA, V. M. e MEHTA, P. K. – Pozolanic and Cementitious Material – Advanced in Concrete Technology Vol. 1 -, Amsterdam, 1996.

MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – DNIT. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274 p. (IPR. Publ., 719).

MARCON, A. F. Durabilidade e Módulo de Elasticidade de Misturas Areia-cal-cinza volante. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1977.

MATEOS, M. Soil Lime Research at Iowa State University. Journal of Soil Mechanics and Foundations Divisions. ASCE, New York, v.90, p. 127-153, 1964.

MEDEIROS, S. A. Incorporação de lodo de tanque séptico como matéria prima de uma mistura asfáltica. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. UFRN. Natal/RN, 2006. 105 p.

MEDINA, J. Apostila de Estabilização de Solos – COPPE/UFRJ. 1987.

MEDINA, J. Mecânica dos Pavimentos. 1ª ed. Editora UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil.. 1997.

MEHTA P.K., MONTEIRO P.J.M. Concreto: Estrutura, propriedades e materiais. Editora PINI, São Paulo, 2000.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. Concreto – Estrutura, propriedades e materiais. São Paulo, 1994.

MENESES, C. G. R. Caracterização físico-química e Geológica dos resíduos de sistemas tipo tanque séptico-sumidouro da cidade do Natal. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Natal/RN. UFRN, 2001.

METCALF e EDDY, INC. Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse. Third Edition, New York 1992.

MONZÓ, J. et al. Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars. Cement and Concrete Research, v. 26, Nº 9, p. 1389 – 1398, 1996.

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, R. S. Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil Para Aplicação de Baixo Volume de Tráfego. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005.

NARDI, J. V. Estabilização de Areia com Cinza Volante e cal; Efeito do cimento como aditivo e de Brita na Mistura. Dissertação (Mestrado). 1975.

OKUNO, N. et al. – Evaluation of thermal Sludge Solidification. In: Wat. Sci. Tech. Vol. 36, n. 11., PP. 227-233. IAWQ. Proceedings ... Great Britain, 1997.

OLVEIRA, F. U. de. Avaliação de três métodos de ensaio para determinação do potencial de expansão de escórias de aciaria para uso em pavimentação. Dissertação (Mestrado). UFES, 2006.

ONAKA, T. Sewage can make Portland cement: a new technology for ultimate reuse of sewage sludge. Water Science & Technology, v.41, n. 8, p. 93-8, 2000.

PENA, D. C. Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para Pavimentação. Dissertação (Mestrado). UFES, 2007.

PENDRYS, J. P. Biodegradation of Asphalt Cement – 20 by Aerobic Bactéria. Applied and Environmental microbiology. p. 1357-1362, June, 1989.

PINTO, S. Estabilização de Areia com Adição de Cal e Cinza Volante. Dissertação (Mestrado), UFRJ, 1971.

- PINTO, S. PREUSSLER, E. Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. 2 ed. Rio de Janeiro: copiarte. 269 p. Isbn 85-902537-1-6. 2002.
- PROSAB, Resíduo Sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RiMA, ABES, p. 282, 2001.
- RAPOSO, C. O. L. Estudo experimental de compactação e Expansão de uma escória de aciaria LD para uso em Pavimentação. Dissertação (Mestrado), UFES, 2005.
- ROHDE, L. Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – estudo laboratorial. Dissertação (Mestrado). UFRGS, 2002.
- SAITO, L. M. Incorporação de resíduo em tijolos de cerâmica. Revista Ambiente, vol. 8, São Paulo, 1994.
- SANDRONI, S., CONSOLI, N. C. Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com Dois Solos Difíceis: Os Extremamente Moles e os Expansivos. COBRAMSEG 2010. Anais. PP. 97–186. 2010.
- SANTOS, Ailton Dias dos. Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgotos da Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003. P. 265. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia da Construção Civil Sapo Paulo, 2003.
- SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B., “Estabilização dos solos com cal e betume”. In: 6° Reunião de pavimentação urbana, pp.74 – 97, Santos – São Paulo, Abril, 1995.
- SILVA, et al. Estudo da viabilidade técnica do uso de misturas de solo, cimento e RCD para fins de pavimentação. Seminário de Engenharia Civil, 10 p. UEM, 2011.
- SOLIZ, V. V. P. Estudo dos três solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica. Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- TAY, J. Bricks Manufactured from Sludge. Journal of Environmental Engineering, vol. 113, N.2, April 1987.

TAY, J. H. e SHOW, K. Y. Properties of cement made from sludge. Journal of Environmental Engineering. Vol. 117, N.2., March/April, 1991.

TAY, J. H.: SHOW, K. Y. Properties of cement made from sludge. Journal of environmental engineering. [S.1.]. v. 117, n. 2, p. 236-246, 1991.

TRINDADE, T. P., CARVALHO, C. A. B., SILVA C. H. C., LIMA, D. C., and BARBOSA, P. S. A. Resilient modulus of structured/cemented soils stabilized with cement. Symposium on Resilient Modulus Testing for Pavement Components, ASTM STP 1437, G. N. Durham W. A. Marr and W. DeGroff. Eds., American Society for testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2003.

VELUPILLAI, L., MAHIN, D. B., WARSHAW, J. W., WAILES, E. J. A Study of the Market for the Rice-Husk-to-Energy Systems and Equipment. Louisiana Agricultural Centre, 24 p. Louisiana, 1996.

VENDRUSCOLO, M. A. (1996) "Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado". Porto Alegre, 141 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

VIZCARRA, G. O. C. 2010. Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos. M.Sc. Civil Engineering Department of Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, PUC-Rio, Brazil.

VOGT, J. C., Estabilização Betuminosa. In: 7^o Simpósio sobre pesquisas rodoviárias, Rio de Janeiro. Julho, 1971.

WERTHER, J. OGADA, T. Sewage sludge combustion. Progress in energy and combustion science, [S.1]. n. 25, p. 55-116, 1999.