



AVALIAÇÃO DO USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA
ESTABILIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO

Tamile Antunes Kelm

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Rio de Janeiro
Março de 2014

AVALIAÇÃO DO USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA
ESTABILIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO

Tamile Antunes Kelm

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Laura Maria Goretti da Motta, D. Sc.

Prof. Maria Claudia Barbosa, D. Sc.

Prof. Luciano Pivoto Specht, Dr. Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2014

Kelm, Tamile Antunes

Avaliação do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação/Tamile Antunes Kelm– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XXI, 209 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 162-170.

1. Lodo de ETE. 2. Estabilização de solos. 3 Pavimentação. I. Motta, Laura Maria Goretti da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais Nair e Neri,
meu irmão Fabrício,
e meu namorado Diego Arthur.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida e por sempre me manter firme e forte, guiando meus passos para a realização dos meus sonhos.

Aos meus queridos pais, Nair e Neri, por tudo que fizeram por mim até hoje, pelo incentivo, pelos ensinamentos, carinho, amor e toda confiança em mim depositada. Ao meu irmãozinho Fabrício, agradeço por todos os momentos de descontração e felicidade.

Ao meu namorado Diego Arthur por tudo que já vivemos juntos. Obrigada por estar sempre ao meu lado, por todo o carinho e amor.

A minha orientadora Laura Motta, agradeço pela dedicação e colaboração neste trabalho. Obrigada pelo incentivo, atenção, por todos os ensinamentos e por ter me recebido de braços abertos com muito carinho.

Ao professor Luciano Specht, pelo incentivo a pesquisa desde os primeiros passos da graduação. Ao professor Casanova, por todas as suas contribuições neste trabalho. Aos professores: Maria Claudia e Antônio Guimarães, pelas sugestões dadas.

A Mariluce, por todos os conselhos e ajuda na elaboração deste trabalho. A todos do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação, pela amizade e ajuda na realização dos ensaios: Allan, Álvaro, Beto, Bia, Bororó, Carlinhos, Gil, Leandro, Luizão, Marcos, Maria da Glória, Maiara, Rodrigo, Serginho, Thiago e Washington.

A ETE ALEGRIA, por ter fornecido o resíduo lodo de esgoto. Ao CETEM pelas análises químicas realizadas e ao Laboratório de Estruturas, pelos ensaios de ATG e ATD. A Maria Cristina, do LEMA, pelas análises microbiológicas e por toda sua atenção.

Aos professores do Mestrado pelos ensinamentos e experiências compartilhadas.

Aos colegas e amigos da Geotecnia, pelo auxílio nos estudos e pela amizade construída!

A todos os amigos da rua Cambucá, Andrea, Bartos, Bel, Caito, Dimas, Elton, Jaelson, João e Saulo, por todos os momentos de descontração e alegria!

A CAPES, pelo suporte financeiro.

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

AVALIAÇÃO DO USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA
ESTABILIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO

Tamile Antunes Kelm

Março/2014

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Programa: Engenharia Civil

A partir da conceituação do desenvolvimento sustentável, esta pesquisa buscou contribuir para melhor interpretação e compreensão do comportamento do uso de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) na estabilização de materiais para pavimentação em suas diferentes formas (in natura, seco e calcinado). O programa experimental consistiu na caracterização física, química e mecânica dos materiais, experimento piloto, experimento com estabilizantes e caracterização ambiental do resíduo. A partir da análise mecânica e ambiental das misturas, pode-se concluir que a mistura composta por lodo in natura, pó de pedra e cimento, apresentou os melhores resultados, podendo ser utilizada em camadas de base e sub-base de pavimentos, representando uma alternativa para a redução do grave problema ambiental resultante da disposição inadequada deste resíduo no meio ambiente.

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

EVALUATION OF THE USE OF TREATMENT STATION'S SEWER SLUDGE AS A
STABILIZER FOR PAVING MATERIALS

Tamile Antunes Kelm

March / 2014

Advisor: Laura Maria Goretti da Motta

Program: Civil Engineering

From the concept of sustainable development, this study sought to contribute to better understanding and interpretation of sewer sludge's behavior when used as a stabilizer of paving materials in its different forms (in nature, dried and calcined). The experimental program consisted in physical, chemical and mechanical characterization of the materials, pilot experiment, experiment with stabilizers and environmental characterization of the residue. From the mechanical and environmental analysis of mixtures, it was observed that the mixture consisting of stone dust, cement and sewer sludge in its nature form, shown best results, resulting in an employable material for pavement's grade and sub-base courses, representing an alternative to reduce the severe environmental problem resulting from the improper disposal of this waste in the environment.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	xx
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Relevância e justificativa da pesquisa	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo geral.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1. Esgotamento Sanitário	6
2.1.1. Tratamento dos esgotos sanitários	7
2.1.2. Riscos associados ao uso do lodo de esgoto	14
2.1.3. Disposição final do lodo de esgoto	21
2.1.4. Uso benéfico do lodo de esgoto	24
2.1.5. Legislação ambiental	27
2.2. Estabilização de solos	29
2.2.1. Solo-cal	31
2.2.2. Solo-cimento	34
2.3. Estabilização/solidificação.....	36
2.4. Ensaio dinâmico.....	38
2.4.1. Módulo de Resiliência.....	39
2.4.2. Deformação permanente.....	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	47

3.1. Considerações iniciais	47
3.2. Materiais	49
3.2.1. Solo	49
3.2.2. Material granular (pó de pedra).....	51
3.2.3. Lodo de ETE.....	52
3.2.4. Cal.....	62
3.2.5. Cimento.....	63
3.3. Misturas estudadas.....	64
3.3.1. Experimento piloto.....	64
3.3.2. Experimento com estabilizantes	67
3.4. Procedimento experimental	69
3.4.1. Ensaio de caracterização física	71
3.4.2. Ensaio de caracterização química e ambiental.....	72
3.4.3. Ensaio de caracterização mecânica.....	76
3.4.4. Dimensionamento do pavimento.....	85
4. RESULTADOS	87
4.1. Ensaio de caracterização física	87
4.1.1. Massa específica real dos grãos	87
4.1.2. Limites de Atterberg.....	88
4.1.3. Análise granulométrica.....	89
4.2. Ensaio de caracterização química e ambiental.....	91
4.2.2. Teor de matéria orgânica	93
4.2.3. Análise Termodiferencial (ATD) e Análise Termogravimétrica (ATG).....	94
4.2.4. Composição química	95
4.2.5. Análise mineralógica.....	98
4.2.6. Ensaio de lixiviação e solubilização	101

4.3. Ensaio de caracterização mecânica.....	108
4.3.1. Ensaio de compactação.....	108
4.3.2. Ensaio de módulo de resiliência.....	109
4.3.3. Deformação permanente.....	113
4.4. Expansão.....	117
4.5. Experimento Piloto.....	119
4.5.1. Ensaio de Compactação	119
4.5.2. Ensaio de Módulo de Resiliência.....	122
4.5 Experimento com estabilizantes	128
4.5.1 Misturas com lodo seco em estufa a 60°C.....	128
4.5.3. Misturas com lodo in natura.....	138
4.5.4. Misturas com cinza de lodo de ETE.....	143
4.5.5. Ensaio de deformação permanente das misturas	148
4.6. Dimensionamento do pavimento.....	150
4.7. Considerações das misturas estudadas	153
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS.....	158
5.1. Conclusões	158
5.2. Sugestões futuras	160
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	162
ANEXO A.....	171
ANEXO B	175
ANEXO C	181
ANEXO D.....	195

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Tratamento da fase líquida de esgotos. (1) cidade; (2) rede de esgotos; (3) e (4) tratamento preliminar, grades e caixas de areia; (5) tratamento primário, decantador; (6) e (7) tratamento secundário, tanque de aeração e decantador; (8) desaguamento no rio. Fonte: SABESP (2013).....	8
Figura 2.2: Tratamento da fase sólida (1) cidade (2) entrada do lodo primário (3) entrada do lodo secundário (4) adensadores (5) flotadores (6) digestores (7) filtro prensa (8) esteira (9) tortas para o aterro sanitário. Fonte: SABESP (2013).....	11
Figura 2.3: Digestores da ETE Alegria (CEDAE, 2012 <i>apud</i> Braz, 2012).....	13
Figura 2.4: Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos de um pavimento asfáltico (FRANCO, 2007)	38
Figura 2.5: Comportamento dos materiais de pavimentação sujeitos a um ciclo de carregamento (FRANCO, 2007).....	40
Figura 3.1: Fluxograma das atividades da presente pesquisa.....	47
Figura 3.2: Localização da Jazida do Manelão onde foi coletado o solo deste estudo	50
Figura 3.3: Jazida do Manelão onde foi coletado o solo desta pesquisa	50
Figura 3.4: Aparência do solo no momento da coleta na Jazida Manelão.....	51
Figura 3.5: Localização da Pedreira Sepetiba onde foi coletado o pó de pedra deste estudo	52
Figura 3.6: Amostra de pó de pedra utilizado neste estudo.....	52
Figura 3.7: Localização da Estação de Tratamento de Esgoto Alegria onde foi tratado o lodo de esgoto utilizado neste estudo	53
Figura 3.8: Imagem panorâmica da ETE Alegria (CÁPUA ENGENHARIA, 2013)	54
Figura 3.9: Etapas de tratamento de esgoto da ETE Alegria.....	54
Figura 3.10: Coleta do lodo de esgoto na ETE Alegria e armazenamento no Laboratório da COPPE em maio de 2013	57
Figura 3.11: Quebra de torrões de lodo de esgoto após secagem por 5 dias a 60°C59	
Figura 3.12: Procedimento para secagem da amostra de lodo de ETE neste trabalho	59

Figura 3.13: Perda de massa da amostra de lodo de esgoto em função da temperatura da mufla usada neste experimento	61
Figura 3.14: Mufla utilizada para a calcinação do lodo de ETE deste estudo.....	61
Figura 3.15: Cinza de lodo de ETE obtida a temperatura de 550°C e destorroada com almofariz e mão de gral, usada no presente estudo.....	62
Figura 3.16: Misturas S95L5 e P95L5 para um corpo de prova	66
Figura 3.17: Misturas S90L10 e P90L10 para um corpo de prova	66
Figura 3.18: Misturas S85L15 e P85L5 para um corpo de prova.....	66
Figura 3.19: Procedimento para mistura de solo-resíduo-estabilizante	67
Figura 3.20: Algumas misturas realizadas no experimento com estabilizantes	69
Figura 3.21: Fluxograma dos ensaios de caracterização dos materiais deste estudo	70
Figura 3.22: Fluxograma dos ensaios realizados no experimento piloto deste estudo	70
Figura 3.23: Fluxograma dos ensaios realizados no experimento com estabilizantes neste estudo	70
Figura 3.24: Procedimentos do método de Eades e Grim (1966) realizados nesta pesquisa.....	76
Figura 3.25: Esquema ilustrativo do equipamento de ensaios triaxiais de carga repetida (Medina e Motta, 2005).....	79
Figura 3.26: Equipamento de ensaio triaxial de cargas repetidas do Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ	80
Figura 3.27: Aparelho utilizado para ensaio de expansão LNEC nesta pesquisa.....	84
Figura 3.28: Etapa do ensaio de expansão CBR numa amostra deste estudo	85
Figura 3.29: Fluxograma do método integrado de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos (FRANCO, 2007)	86
Figura 4.1: Curvas granulométricas dos materiais deste estudo	90
Figura 4.2: Análise Termodiferencial e Termogravimétrica do lodo de ETE da segunda coleta deste estudo.....	94
Figura 4.3: Difração de raio X do solo deste estudo	99
Figura 4.4: Difração de raio X do pó de pedra deste estudo.....	99
Figura 4.5: Difração de raio X do lodo de esgoto - primeira coleta deste estudo.....	99
Figura 4.6: Difração de raio X do lodo - 2ª coleta deste estudo.....	100

Figura 4.7: Difração de raio X do lodo calcinado deste estudo	100
Figura 4.8: Curva de compactação do solo e pó de pedra deste estudo	109
Figura 4.9: Módulo de resiliência do solo deste estudo em função da (a) tensão desvio, (b) tensão confinante – três corpos de prova.....	110
Figura 4.10: Módulo de resiliência do pó de pedra deste estudo em função da (a) tensão desvio, (b) tensão confinante – três corpos de prova.	110
Figura 4.11: Resultado de deformação permanente de solo deste estudo.....	114
Figura 4.12: Resultado de deformação permanente de pó de pedra deste estudo	115
Figura 4.13: Curvas de compactação do solo e das misturas solo-lodo deste estudo	120
Figura. 4.14: Curvas de compactação do pó de pedra e misturas pó de pedra-lodo deste estudo	122
Figura 4.15: Linhas de tendência dos resultados dos ensaios de módulo de resiliência do solo e das misturas solo – lodo deste estudo	124
Figura 4.16: Linhas de tendência dos resultados do ensaio de módulo de resiliência do pó de pedra e das misturas pó-lodo deste estudo	124
Figura 4.17: Linhas de tendência dos resultados do ensaio de módulo de resiliência da mistura S90L10 ao longo da curva de compactação.....	126
Figura 4.18: Linhas de tendência dos resultados do ensaio de módulo de resiliência da mistura S85L15 ao longo da curva de compactação.....	126
Figura 4.19: Linhas de tendência dos resultados do ensaio de módulo de resiliência da mistura P90L10 ao longo da curva de compactação.....	127
Figura 4.20: Linhas de tendência dos resultados do ensaio de módulo de resiliência da mistura P85L15 ao longo da curva de compactação.....	127
Figura 4.21: Resultados da dosagem do Método de Eades e Grim para mistura solo-lodo deste estudo.....	129
Figura 4.22: Trincas ocorridas durante a cura devido a expansão da mistura S82L15C3 deste estudo	130
Figura 4.23: Corpos de prova de pó de pedra – lodo - cimento: (a) aos 7 dias com trinca e (b) aos 28 dias com mofo	131
Figura 4.24: Mistura S90L5C5, tempo de cura de 7 dias	132

Figura 4.25: Resultados da curva de compactação da mistura S90L5C5 deste estudo.....	133
Figura 4.26: Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência para a mistura S90L5C5 aos 7, 28 e 90 dias de cura.....	135
Figura 4.27: Resultados de Módulo de Resiliência para a mistura P91L5Ci4 aos 7, 14 e 28 dias de cura	137
Figura 4.28: Resultados dos ensaios de módulo de resiliência das misturas-testes P91LN5Ci4 e P81LN15Ci4.....	140
Figura 4.29: Resultados de Módulo de Resiliência da mistura P91LNCi4 aos 7, 17 e 28 dias de cura.....	142
Figura 4.30: Curvas de compactação das misturas S95C5 e S80CL15C5 deste estudo.....	143
Figura 4.31: Resultados de Módulo de Resiliência da mistura S80CL15C5 para idades de cura de 7, 28 e 90 dias	147
Figura 4.32: Resultados de Módulo de Resiliência da mistura S95C5 para idades de cura de 7, 28 e 90 dias.....	148
Figura 4.33: Resultados de deformação permanente das misturas e dos materiais estudados	149
Figura 4.34: Resultados de módulo de resiliência das misturas e materiais deste estudo para tensão confinante de 0,021MPa.....	154
Figura 4.35: Resultados de módulo de resiliência das misturas e materiais para tensão confinante de 0,137MPa	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Fontes de contaminação e efeitos sobre a saúde de metais encontrados no lodo (SILVA <i>et al</i> , 2001 <i>apud</i> ALAMINO, 2010)	16
Tabela 2.2: Principais agentes patogênicos no lodo correlacionados com as doenças causadas	17
Tabela 2.3: Temperatura e tempo de manutenção para a destruição de alguns organismos	20
Tabela 2.4: Principais meios de destinação do lodo de esgoto	22
Tabela 2.5: Classes do lodo de esgoto segundo a densidade admissível de patogênicos e processos de tratamento recomendados (CONAMA, 2006)	29
Tabela 3.1: Propriedades da cal utilizada na pesquisa segundo a NBR 7175/2003	63
Tabela 3.2: Critérios do cimento CPIIF-32	64
Tabela 3.3: Misturas estudadas no experimento piloto desta dissertação.....	65
Tabela 3.4: Misturas estudadas no experimento com estabilizantes	68
Tabela 4.1: Resultados de massa específica real dos grãos dos materiais desta pesquisa.....	87
Tabela 4.2: Resultados de limites de Atterberg dos materiais.....	88
Tabela 4.3: Resultados dos ensaios físico-químicos e bacteriológicos das amostras de lodo de esgoto deste estudo.....	91
Tabela 4.4: Resultados das análises microbiológicas da terceira coleta de lodo de esgoto	93
Tabela 4.5: Resultados de matéria orgânica.....	93
Tabela 4.6: Análise química semiquantitativa em percentagem dos materiais utilizados na pesquisa.....	96
Tabela 4.7: Análise química da cinza de lodo e lodo in natura da literatura em percentagem	98
Tabela 4.8: Resultados da corrosividade, reatividade e inflamabilidade do lodo de ETE deste estudo.....	102
Tabela 4.9: Resultados dos ensaios de lixiviação- parâmetros inorgânicos do lodo de esgoto deste estudo.....	102

Tabela 4.10: Resultados dos ensaios de lixiviação – parâmetros pesticidas do lodo deste estudo	103
Tabela 4.11: Resultados dos ensaios de lixiviação – parâmetros outros orgânicos do lodo deste estudo.....	103
Tabela 4.12: Resultados dos ensaios de solubilização – parâmetros inorgânicos do lodo deste estudo	104
Tabela 4.13: Resultados dos ensaios de solubilização – parâmetros orgânicos do lodo deste estudo	105
Tabela 4.14: Resultados da corrosividade, reatividade e inflamabilidade da cinza do lodo de ETE deste estudo	106
Tabela 4.15: Resultados de lixiviação da cinza de lodo de ETE deste estudo	107
Tabela 4.16: Resultados de solubilização da cinza de lodo de ETE deste estudo ..	107
Tabela 4.17: Resultados obtidos do ensaio de compactação dos materiais.....	109
Tabela 4.18: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência para o solo deste estudo	112
Tabela 4.19: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência para o pó de pedra deste estudo	112
Tabela 4.20: Resultado dos parâmetros de modelagem tensão – deformação médios para o solo e pó de pedra deste estudo – três corpos de prova.....	112
Tabela 4.21: Resultados de ensaio de deformação permanente para o solo estudado	114
Tabela 4.22: Resultados de ensaio de deformação permanente do pó de pedra estudado	114
Tabela 4.23: Resultados de expansão dos materiais e misturas	118
Tabela 4.24: Resultados de expansão das misturas do experimento com estabilizantes.....	118
Tabela 4.25: Resultados obtidos das curvas de compactação do solo e das misturas solo-lodo deste estudo	120
Tabela 4.26: Resultados obtidos das curvas de compactação do material e das misturas pó-lodo deste estudo	122
Tabela 4.27: Resultado dos parâmetros de modelagem estudados para as misturas de lodo de ETE e solo deste estudo.....	123

Tabela 4.28: Resultados dos parâmetros de modelagem estudados para as misturas de lodo de ETE e pó de pedra.....	123
Tabela 4.29: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência (MPa) da mistura S90L5C5 – (lodo seco e destorroado) deste estudo	135
Tabela 4.30: Resultado dos parâmetros de modelagem do MR para a mistura S90L5C5 deste estudo.....	136
Tabela 4.31: Resultado dos parâmetros de modelagem do MR para a mistura P91L5Ci4 deste estudo	136
Tabela 4.32: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência (MPa) da mistura P91L5Ci4 deste estudo	137
Tabela 4.33: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência (MPa) para as misturas testes P81LN15Ci4 e P91LN5Ci4.....	139
Tabela 4.34: Resultados dos parâmetros k1 e k2 obtidos pela regressão linear nos modelos tradicionais de MR	139
Tabela 4.35: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência (MPa) para a mistura P91LN5Ci4	141
Tabela 4.36: Resultado dos parâmetros de modelagem do MR para a mistura P91LN5Ci4 deste estudo.....	142
Tabela 4.37: Resultados das curvas de compactação das misturas S95L5 e S80CL15C5	143
Tabela 4.38: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência (MPa) para a mistura S80CL15C5.....	145
Tabela 4.39: Resultado dos parâmetros de modelagem do MR para a mistura S80CL15C5 deste estudo	145
Tabela 4.40: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência (MPa) da mistura solo-cal	146
Tabela 4.41: Resultado dos parâmetros de modelagem do MR para a mistura solo-cal deste estudo	146
Tabela 4.42: Resultados de deformação permanente das misturas	149
Tabela 4.43: Coeficientes do modelo composto utilizados no SisPav para representar os materiais do presente estudo.....	151
Tabela 4.44: Dados do tráfego utilizado no estudo paramétrico	151

Tabela 4.45: Composições estudadas das estruturas de pavimento com os materiais deste estudo.....	151
Tabela 4.46: Resultados dos valores de módulo de resiliência das misturas e materiais estudados para o menor e maior nível de tensão confinante.....	154

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ATD – Análise termodiferencial

ATG – Análise termogravimétrica

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

GC – Grau de compactação

HRB – Highway Research Board

ISC - Índice de Suporte Califórnia

L.M.L – Limite máximo lixiviado

L.M.S – Limite máximo solubilizado

LVDT – Linear Variable Differential Transducers

MEAS – Massa específica aparente seca

MR – Módulo de Resiliência

N – Número de repetições de carga

NBR – Norma Brasileira

NMP – Número Mais Provável

SF – Sólidos Fixos

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

W - umidade

σ_d - Tensão desvio

σ_3 – Tensão Confinante

ϵ_a – Deformação específica axial resiliente

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Nas áreas urbanas os principais agentes poluidores de águas são os esgotos, na maioria das vezes lançados diretamente nos corpos de água. Frente à degradação intensa dos recursos hídricos, os esgotos de diversas cidades brasileiras vêm sendo tratados em estações de tratamento de esgoto (ETE), que operam com diferentes sistemas tecnológicos. Nestes sistemas de tratamento de águas residuais, finalizado o processo, a água isenta da maioria dos resíduos sólidos e orgânicos, retorna aos mananciais com bom grau de pureza. No entanto, ocorre a geração de um resíduo semissólido, pastoso e de natureza predominantemente orgânica, chamado de lodo de esgoto.

A quantidade de lodo de esgoto cresce proporcionalmente ao aumento dos serviços de coleta e tratamento de esgoto, que por sua vez, deve acompanhar o crescimento populacional. Em 2010, estimativas apontavam uma produção nacional de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca proveniente do tratamento de esgoto por ano, considerando que o tratamento de esgoto atingia apenas 30% da população urbana (PEDROZA *et al*, 2010).

A destinação final do lodo é uma atividade de grande importância e complexidade, pois frequentemente extrapola os limites das estações de tratamento e exige a integração com outros setores da sociedade. Segundo a legislação de diversos países, e também a brasileira, a responsabilidade pelos problemas que podem ser causados pelo destino inadequado é sempre dos produtores do resíduo, que podem ser enquadrados na lei de crimes ambientais (Brasil, Lei nº 9.605 de 12/02/98). Neste sentido, alguns órgãos ambientais começaram a exigir, cada vez mais, o detalhamento de alternativas de disposição final no processo de licenciamento de ETE, o que representa um grande avanço na gestão ambiental do país (ANDREOLI, 2001).

A Lei Federal nº 12.305 de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, estabelece princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, e também define as responsabilidades dos geradores e do poder público. Segundo a referida Lei, deve-se observar o atendimento da seguinte ordem de prioridade na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

A importância da destinação deste resíduo foi reconhecida pela Agenda 21 (AGENDA 21 BRASILEIRA, 2003) que em seu capítulo 21 trata da disposição final de resíduos do saneamento. A recomendação remete inicialmente a medidas que visem: a redução da produção do resíduo, seguida de alternativas de reuso, reciclagem e, por último, de adoção de medidas de disposição final. O conceito da reciclagem exige a adoção de alternativas tecnológicas que maximizem os benefícios dos resíduos, mas considerando cuidadosamente os riscos ambientais e sanitários decorrentes, de forma a gerar alternativas seguras e economicamente viáveis que garantam a sustentabilidade do processo.

Dentre as principais destinações do lodo, a opção mais empregada é descartar em aterros sanitários. Porém, muitos destes aterros estão com sua capacidade praticamente esgotada, vindo-se a necessidade de se implantar alternativas para o uso deste resíduo através de práticas que permitam uma disposição final adequada e segura devido a que sua composição pode conter compostos patogênicos que causem risco ao meio ambiente e à saúde da população.

A partir da conceituação do desenvolvimento sustentável, várias pesquisas têm buscado a utilização de resíduos. O uso do lodo tratado como material alternativo na construção civil tem mostrado sucesso em pesquisas de caráter mundial, que buscam viabilizar a sua aplicação na produção de argamassas, fabricação de cimento, em camadas de cobertura de aterro sanitário, como agregado miúdo, na produção de concreto e também na pavimentação.

A pavimentação pela sua extensão e grandes volumes de solo mobilizados, constitui-se em uma alternativa ao reuso de resíduos, principalmente aqueles com certo potencial de estabilização, granulométrica ou química. Os resíduos industriais ou subprodutos, quando usados próximos às áreas em que são produzidos, reduzido o custo de transporte, resultam geralmente, em soluções de baixo custo, permitindo aplicações proveitosas na execução de bases e sub-bases de estradas (CORDEIRO, 2007).

Além disso, a construção de rodovias é particularmente propícia a esta finalidade, de local de destinação do resíduo, tendo em vista a particularidade de permitir certo encapsulamento, e mesmo a contenção de metais ou outros poluentes, por combinação com outros materiais usuais de construção das camadas do pavimento.

Alguns trabalhos brasileiros utilizaram resíduo de lodo de esgoto na pavimentação, tais como MEDEIROS (2006), LUCENA (2012) e PEREIRA (2012), obtendo resultados mecânicos, ambientais e econômicos satisfatórios.

Dentro deste contexto, o presente estudo busca contribuir para melhor interpretação e compreensão do comportamento do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação, em suas diferentes formas (in natura, seco e calcinado). Visa potencializar a sua utilização em obras de pavimentação rodoviária, dando um fim mais nobre a este material.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo principal do estudo é avaliar o comportamento mecânico e ambiental de misturas de lodo proveniente das atividades de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da cidade do Rio de Janeiro, para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos.

1.2.2. Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo principal, foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Escolher dois materiais de pavimentação usualmente empregados nas ruas do Rio de Janeiro para testar sua combinação com o lodo;
- Realizar caracterização química, física e mineralógica dos materiais estudados (solo, pó de pedra e resíduo de lodo de ETE);
- Avaliar o comportamento mecânico do solo e pó de pedra, utilizando ensaios de deformação permanente e módulo de resiliência;
- Avaliar o comportamento mecânico de solo-lodo e pó de pedra-lodo, por ensaio de módulo de resiliência;
- Avaliar a adição de estabilizantes (cal, cimento) às misturas por meio de propriedades mecânicas;
- Avaliar e comparar as diferentes formas de incorporação do resíduo nas misturas, seja in natura, seco ou calcinado, quanto ao comportamento mecânico;
- Avaliar o comportamento ambiental do resíduo lodo de esgoto por ensaios de solubilização e lixiviação;
- Verificar o comportamento de uma estrutura de pavimento usando as melhores combinações testadas utilizando um modelo mecanístico-empírico;
- Pela análise global dos resultados obtidos, concluir se há viabilidade técnica e ambiental para a utilização de lodo de ETE na estabilização de materiais para pavimentação.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em cinco capítulos, iniciando-se por este primeiro capítulo que aborda as justificativas e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, faz-se uma revisão bibliográfica sobre os assuntos abordados na pesquisa: resíduo lodo de esgoto, legislação ambiental, estabilização de solos, e ensaios dinâmicos.

No Capítulo 3, é detalhado o método e o planejamento aplicados na pesquisa, sendo descritos os materiais utilizados e procedimentos dos ensaios.

No Capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados obtidos da caracterização física, química e mecânica dos materiais e misturas, bem como avaliada a aplicabilidade do resíduo de lodo de esgoto para utilização em camadas de base e/ou sub-base de pavimentos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas e também sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, estão incluídas as Referências Bibliográficas e os seguintes Anexos:

ANEXO A – Relatórios dos ensaios microbiológicos do lodo de esgoto.

ANEXO B – Gráficos de DRX dos materiais.

ANEXO C – Relatórios dos ensaios de lixiviação e solubilização do lodo in natura e da cinza de lodo de ETE.

ANEXO D – Relatórios técnicos do dimensionamento do pavimento – SispavBr (2013).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. ESGOTAMENTO SANITÁRIO

A construção de Estações de Tratamento de Esgoto é algo recente na história mundial. Algumas civilizações antigas desenvolveram métodos precários de coleta de esgoto sem etapa de tratamento e, portanto não havia geração do lodo. Esta precariedade do sistema foi responsável pela peste negra e outras doenças infecciosas que resultou na morte de milhares de pessoas nos séculos passados (LUCENA, 2012).

Existe hoje uma grande preocupação em relação ao grau de tratamento e ao destino final dos esgotos, as suas consequências sobre o meio ambiente, a qualidade das águas, e seus usos benéficos. Segundo dados do Plano Nacional de Saneamento Básico do Brasil (2008), somente 55% dos municípios brasileiros possuíam rede coletora de esgoto até aquela data. Dessa parcela provida de coleta, apenas 29,5% do esgoto recebe tratamento, o que representa um número baixíssimo, e mostra o longo caminho a ser percorrido em matéria de tratamento.

A região Sudeste tem em média, 48% de municípios que oferecem tratamento, destacando-se o Estado de São Paulo que registra 78%. O Estado do Rio de Janeiro apresenta 92% dos municípios com o serviço de coleta de esgoto, porém, somente 59% das cidades fluminenses contam com rede eficiente de tratamento de esgoto segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008 (IBGE, 2008).

No Nordeste, as disparidades são grandes: enquanto o Ceará tem 49% de cidades que possuem tratamento de esgoto e Pernambuco, 28%, o Piauí tem apenas 2% e o Maranhão, 1%. Mesmo o Norte, que tem o pior desempenho regional (só 8% dos municípios têm tratamento do esgoto), tem seus Estados com melhor desempenho do que os dois últimos nordestinos. O Acre tem o melhor desempenho na região Norte, com 18% dos municípios fazendo tratamento do esgoto, já Pará e Rondônia têm 4% cada.

No Sul, o Paraná tem o melhor desempenho: são 41% contra 16% de Santa Catarina e 15% do Rio Grande do Sul. No Centro-Oeste, Mato Grosso do Sul tem 44% das suas cidades com oferta de tratamento, Mato Grosso, 16% e Goiás, 24%.

Se a coleta do esgoto é um serviço ainda pouco disseminado na maior parte do território brasileiro, o tratamento é algo ainda mais incomum, originando graves consequências ao meio ambiente e à saúde pública. Tendo em conta este aspecto, estudos, critérios e projetos relativos ao tratamento e a disposição final dos esgotos, deverão ser procedidos de forma a reverter a redução de gastos, especialmente com a saúde, e na preservação ambiental.

2.1.1. Tratamento dos esgotos sanitários

Segundo Jordão & Pessôa (2011), o esgoto sanitário contém aproximadamente 99,92% de água. A fração restante de 0,08% é formada por sólidos orgânicos e inorgânicos, em suspensão e dissolvidos, bem como microrganismos, e constitui a causa da necessidade de tratamento dos esgotos.

O tratamento dos esgotos pode ser dividido em duas fases: fase líquida e fase sólida. A fase líquida pode ser composta por esgotos domésticos, águas de infiltração e despejos industriais. A fase sólida é composta por subprodutos gerados durante o tratamento da fase líquida (sólidos grosseiros, areia e lodo). Dentre estes, o lodo de esgoto tem maior importância para destinação por ser considerado um resíduo de difícil tratamento e disposição final (FONTES, 2003).

2.1.1.1. Tratamento da fase líquida

A classificação do tratamento dos esgotos na fase líquida é dada de acordo com os seguintes níveis: preliminar, primário, secundário e eventualmente, terciário. A Figura 2.1 mostra um esquema do tratamento de esgoto na fase líquida.



Figura 2.1: Tratamento da fase líquida de esgotos. (1) cidade; (2) rede de esgotos; (3) e (4) tratamento preliminar, grades e caixas de areia; (5) tratamento primário, decantador; (6) e (7) tratamento secundário, tanque de aeração e decantador; (8) desaguamento no rio. Fonte: SABESP (2013).

Os níveis podem ser explicados sucintamente como segue:

- Tratamento Preliminar

O tratamento preliminar consiste basicamente na remoção de sólidos grosseiros e areia. A remoção de sólidos grosseiros é feita, normalmente, por meio de grades, na qual os resíduos com dimensões maiores do que o espaço entre as barras fica retido. A remoção da areia é feita através de uma unidade denominada caixa de areia ou *desarenador*. Neste processo, o grão de areia sedimenta no fundo da caixa, enquanto a matéria orgânica permanece em suspensão no meio do líquido (FONTES, 2003).

O resíduo resultante do processo do tratamento preliminar deverá ser encaminhado para locais sob o controle de autoridades sanitárias. Segundo Jordão & Pessoa (2011), geralmente o resíduo tem como destino o aterro sanitário ou a incineração.

No Brasil, o mais usual e aceito, é dar aos sólidos removidos o mesmo destino dos lixos urbanos, em aterros sanitários. O emprego da incineração seria o mais indicado sob o ponto de vista sanitário, pois quando disponível pode-se

utilizar o próprio gás produzido no digestor da estação como combustível. Porém, segundo Jordão & Pessoa (2011) deve-se verificar, no entanto, uma possível poluição atmosférica que poderá ser gerada no processo de queima.

- Tratamento Primário

O tratamento primário tem por objetivo remover os sólidos em suspensão e os sólidos flutuantes. A remoção é feita através de decantadores, na qual os sólidos com densidade maior do que a densidade da massa líquida, vão se depositando lentamente no fundo do tanque e recebem o nome de lodo primário. Em seguida, o efluente líquido é encaminhado para o tratamento secundário, ou para o corpo receptor, e o lodo primário é encaminhado para o tratamento da fase sólida, ambos por meio de tubulações (FONTES, 2003).

- Tratamento Secundário

O tratamento secundário tem como objetivo remover a matéria orgânica através de processos biológicos. Dentre os vários tipos existentes de tratamento secundário estão: sistemas de lagoas de estabilização, sistemas de lodos ativados e sistemas aerados com biofilmes.

- a) Sistemas de lagoas de estabilização

As lagoas de estabilização são sistemas de tratamento biológico em que a estabilização da matéria orgânica é realizada pela oxidação bacteriológica e/ou redução fotossintética de algas. É um sistema de tratamento de esgoto muito utilizado no Brasil devido a simplicidade e eficiência do processo e o baixo custo de construção e operação.

Neste sistema, a matéria orgânica, na forma de sólidos em suspensão, fica no fundo da lagoa, formando um lodo que vai aos poucos sendo estabilizado. As algas existentes no esgoto, na presença de luz, produzem oxigênio que é liberado pela fotossíntese. Esse oxigênio dissolvido é utilizado pelas bactérias aeróbicas para se alimentarem da matéria orgânica presente no esgoto, que está dissolvida e em suspensão. O resultado são sais minerais (alimento das algas) e gás carbônico.

b) Sistemas de lodo ativado

O processo do sistema de lodo ativado é biológico. O esgoto afluyente e o lodo ativado são intimamente misturados, agitados e aerados em unidades chamadas de tanque de aeração, para logo após separar os lodos ativados do esgoto (por sedimentação em decantadores). A maior parte do lodo ativado assim separado retorna para o processo, enquanto uma parcela menor é retirada para tratamento específico ou destino final, o chamado lodo em excesso. O esgoto tratado verte pela canaleta vertedora do decantador, no qual ocorreu a separação, caracterizando o efluente final (JORDÃO & PÊSSOA, 2011).

c) Tratamento aeróbio com biofilme

Neste sistema a estabilização da matéria orgânica é realizada por bactérias. A entrada dos esgotos nos filtros biológicos é feita por distribuidores rotativos em forma de gotas ou jatos, no qual os esgotos percolam através do material de revestimento (pedras, ripas ou material plástico) em direção aos drenos de fundo, contribuindo para o crescimento bacteriano. O ar circula nos espaços vazios entre as pedras ou ripas, fornecendo oxigênio para os microrganismos decomporem a matéria orgânica (FONTES, 2003).

- Tratamento Terciário

O tratamento terciário tem como objetivo remover do efluente secundário os microrganismos antes do lançamento final no corpo receptor. Em casos especiais é necessária a remoção de determinados nutrientes, tais como o nitrogênio e fósforo, que podem potencializar, isoladamente e/ou em conjunto, a degradação dos corpos d'água.

2.1.1.2. Tratamento da fase sólida

Apesar de não ser o único subproduto gerado em uma estação de tratamento de esgotos, o lodo tem importância maior por ser um resíduo de difícil

tratamento e disposição final, face às grandes quantidades que são geradas, à dificuldade em se encontrar locais adequados para a sua disposição final, à distância de transporte e aos impactos ambientais (JORDÃO & PESSÔA, 2011).

Segundo Andreoli (2001), além de ser um dos maiores desafios técnicos e operacionais do sistema de tratamento de esgoto, a gestão do lodo é também um desafio econômico, já que pode representar até 60% dos custos de operação da estação.

As principais etapas de tratamento do lodo são: adensamento, estabilização, condicionamento e desidratação. A Figura 2.2 mostra um esquema do tratamento da fase sólida segundo SABESP (2013).



Figura 2.2: Tratamento da fase sólida (1) cidade (2) entrada do lodo primário (3) entrada do lodo secundário (4) adensadores (5) flotadores (6) digestores (7) filtro prensa (8) esteira (9) tortas para o aterro sanitário. Fonte: SABESP (2013)

Definindo as principais etapas do tratamento do lodo tem-se:

- Adensamento do lodo

O adensamento do lodo proveniente das unidades de tratamento da fase líquida consiste no aumento da concentração de sólidos nele contidos, pela remoção parcial da quantidade de água que caracteriza o seu grau de umidade

(JORDÃO & PESSÔA, 2011). As alternativas de adensamento incluem o adensamento por gravidade e por flotação.

Segundo Jordão & Pessoa (2011), os modelos convencionais de adensadores por gravidade são constituídos de tanques circulares em estrutura de concreto armado ou metálica. O lodo sedimentado e adensado é removido através de raspadores apropriados e o líquido sobrenadante é retornado para o tratamento primário.

- Estabilização do lodo

A etapa de estabilização do lodo tem como objetivo reduzir a concentração de patógenos na massa de lodo devido à degradação da matéria orgânica biodegradável e evitar a emissão de maus odores.

O lodo pode ser estabilizado através de três processos: (1) estabilização biológica: utiliza bactérias específicas para estabilizar a matéria orgânica biodegradável; (2) estabilização química: estabiliza o lodo por oxidação química da matéria orgânica através de produtos químicos; (3) estabilização térmica: o calor age sobre a fração volátil em recipientes hermeticamente fechados (ANDREOLI, 2001).

Na estabilização biológica, são utilizados os mecanismos naturais de biodegradação que transformam a parte mais putrescível do lodo. Os principais processos são: digestão anaeróbia, digestão aeróbia, digestão aeróbia auto térmica e compostagem.

A digestão anaeróbia é o processo mais utilizado, e consiste na solubilização e redução de substâncias orgânicas complexas pela ação de microrganismos, na ausência de oxigênio. O lodo é colocado em digestores fechados, onde bactérias anaeróbias e facultativas estabilizam a matéria orgânica, produzindo gás carbônico, metano, alguns outros gases e lodo estabilizado.

O gás produzido durante o processo da digestão anaeróbia, chamado biogás, é em parte utilizado no próprio digestor para mistura, adensamento ou

aquecimento do lodo, e o excedente armazenado em gasômetros para processamento ou queima.

Na Figura 2.3 é mostrado o digestor anaeróbio da ETE Alegria na cidade do Rio de Janeiro, localizada bem próxima à Cidade Universitária e operada pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos – CEDAE.



Figura 2.3: Digestores da ETE Alegria (CEDAE, 2012 *apud* Braz, 2012)

Segundo Jordão & Pessôa (2011), a estabilização química constitui uma opção de estabilização do lodo que vem sendo praticada, principalmente pela grande economia de investimento inicial que proporciona em substituição aos digestores anaeróbios clássicos. No Brasil algumas implantações recentes são as da ETEs Lavapés (São José dos Campos, SP), Pavuna e Sarapuí (Rio de Janeiro, RJ), e Goiânia (Goiânia, GO).

- Condicionamento do lodo

É um processo físico ou químico no qual partículas menores de lodo se unem a partículas maiores formando agregados com dimensões superiores a estas partículas. O condicionamento do lodo pode ser realizado através da utilização de

polímeros orgânicos, produtos químicos inorgânicos ou de tratamento térmico (ANDREOLI, 2001).

Os polímeros orgânicos podem ser classificados em neutros, catiônicos e aniônicos do ponto de vista das cargas de superfície. Destes, os polímeros catiônicos são os mais utilizados no condicionamento dos lodos que têm cargas elétricas predominantemente negativas. Eles podem ser encontrados comercialmente em pó ou em líquidos. Os produtos químicos inorgânicos são utilizados principalmente quando a etapa posterior (desidratação) é realizada em filtro a vácuo ou filtro de pressão (ANDREOLI, 2001).

- Desidratação do lodo

A desidratação do lodo tem como objetivo remover a água e reduzir ainda mais o volume, de forma a facilitar o transporte do lodo para o sítio de destino final. Os processos de desidratação podem ser realizados por secagem natural (leito de secagem, lagoa de secagem de lodo) ou por secagem mecanizada (filtro prensa, filtro esteira, centrífugas e secagem térmica) (JORDÃO & PESSÔA, 2011).

A secagem térmica consiste no processo mais eficiente para redução do teor de umidade das tortas de lodo. Segundo Santos (2003), o processo consiste no aquecimento do lodo em ambiente hermeticamente fechado, com a consequente evaporação e coleta da umidade presente. O lodo sai do secador sob a forma de péletes, com teor de sólidos acima de 90%. O líquido evaporado é condensado e retornado à entrada da ETE para tratamento. Uma das principais vantagens deste método é que o produto final é praticamente livre de patógenos, facilitando os usos benéficos do lodo, como por exemplo, na agricultura.

2.1.2. Riscos associados ao uso do lodo de esgoto

O objetivo do sistema de tratamento de esgoto, quando produz o lodo, é concentrar as impurezas e o material potencialmente poluidor dos esgotos nesse subproduto. Assim, pela própria forma como é originado, o lodo é concentrador

dos nutrientes, da matéria orgânica, dos metais pesados, dos microrganismos e de outros elementos que podem oferecer risco ao meio ambiente, caso não sejam controlados e monitorados adequadamente. Nos subitens a seguir serão detalhados os principais contaminantes do lodo.

2.1.2.1. Metais pesados

Do ponto de vista ambiental, o metal pesado é aquele que em determinadas concentrações e tempo de exposição, oferece risco a saúde humana e ao meio ambiente.

Dentre os principais elementos químicos que representam os metais pesados estão a Prata (Ag), Arsênio (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Antimônio (Sb), Selênio (Se), e Zinco (Zn). Alguns deles são necessários aos organismos vivos, como As, Co, Cr, Cu, Se, Zn, porém em concentrações inferiores àquelas consideradas tóxicas aos seres vivos. No entanto, os elementos Pb, Hg e Cd não são encontrados naturalmente em nenhum organismo, sendo sua presença prejudicial em qualquer concentração (SANTOS, 2003).

Na Tabela 2.1 estão descritos as fontes de contaminação e efeitos sobre a saúde humana dos principais metais encontrados no lodo segundo SILVA et al, (2001 *apud* ALAMINO, 2010).

Tabela 2.1: Fontes de contaminação e efeitos sobre a saúde de metais encontrados no lodo
(SILVA *et al*, 2001 *apud* ALAMINO, 2010)

Metal	Fontes de contaminação	Efeitos sobre a saúde
Antimônio	Ligas metálicas, extintores de incêndio, baterias, pigmentos e materiais cerâmicos	Náuseas, vômitos, diarreia, dores estomacais e úlceras. Problemas no coração e pulmão
Arsênio	Óleos combustíveis, pesticidas e herbicidas, conservantes de madeira, ligas metálicas de chumbo e latão	Transtornos gastrointestinais, cardiovasculares e respiratórios, câncer falência renal e desordem no sistema nervoso
Chumbo	Materiais odontológicos, indústrias de aço, efluentes gasosos industriais, fertilizantes, pesticidas, materiais cerâmicos, processos de galvanoplastia, tintas, baterias	Irritabilidade e agressividade, indisposição, dores de cabeça, convulsões, fadiga, dores abdominais, fraqueza, náuseas, osteoporose, anemias etc.
Cobalto	Ligas metálicas, imãs, revestimentos metálicos, pigmentos, secantes para pintura, eletrodos, cabos de aço	Efeitos respiratórios, redução da ventilação, congestão, edema, hemorragia e coma. Pode ser cancerígeno
Cobre	Canalizações de água quente, fábrica de fios elétricos, radiadores de automóveis e tratamento de superfícies metálicas	Tosse, dor de cabeça e dor de garganta. Altas doses causam náuseas, vômito e diarreia, prejudicam rins e pulmões
Cromo	Curtição de couros, galvanoplastias	Dermatites, úlceras cutâneas, inflamação nasal, câncer de pulmão e perfuração do septo nasal
Mercúrio	Termômetros, pesticidas e agrotóxicos, mineração, garimpos, ceras, tintas, pescado contaminado, lâmpadas fluorescentes, galvanoplastia	Depressão, fadiga, tremores, síndrome do pânico, descontrole motor, dificuldade de fala, perda de memória, paralisia das extremidades, alucinações
Níquel	Utensílios de cozinha, baterias, cosméticos óleos hidrogenados, soldas	Cancerígeno, pode causar dermatite de contato, gengivites, estomatites, etc.
Prata	Subproduto da mineração de chumbo, processamento de minério, manufatura de cimento, e a queima de combustível fóssil	Argíria, problemas respiratórios, irritação dos pulmões e da garganta, dores estomacais
Selênio	Fabricação de tintas e pigmentos, vidro indústria de semicondutores, inseticidas, ligas metálicas	Náuseas, vômitos, diarreia, selenose, perda de cabelo, irritação do trato respiratório, bronquite, dores de estômago
Zinco	Metalurgia, indústrias recicladoras de chumbo	Paladar adocicado e secura na garganta, tosse, fraqueza, dor generalizada, arrepios, febre, náusea, vômitos

2.1.2.2. Microrganismos patogênicos

Nos esgotos sanitários são encontrados quatro grupos de organismos patogênicos: fungos, bactérias, vírus e parasitos. Estes microrganismos se concentram no lodo de esgoto, sendo que a densidade de patógenos presentes é variável e dependente das características sanitárias da população e ao tipo de tratamento que o lodo foi submetido (ALAMINO, 2010).

A Tabela 2.2 apresenta os principais agentes patogênicos encontrados no esgoto e no lodo de esgoto e as doenças causadas segundo a WEF (*Water Enviroment Federation*).

Tabela 2.2: Principais agentes patogênicos no lodo correlacionados com as doenças causadas

Organismo	Doença principal
BACTÉRIAS	
<i>Salmonela typhi</i>	Febre tifoide
<i>Salmonella paratyphi</i>	Febre paratifoide
<i>Outras salmonellas</i>	Salmonelose
<i>Shigella</i>	Disenteria bacilar
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>E coli enteropatogênica</i>	Gastroenterite
<i>Yersinia enterocolítica</i>	Gastroenterite
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenterite
ENTEROVÍRUS	
<i>Vírus da polio</i>	Poliomielite
<i>Vírus da hepatite A</i>	Hepatite infecciosa
<i>Enterovírus (vários)</i>	Meningite, encefalite
PROTOZOÁRIOS	
<i>Balantidium coli</i>	Disenteria
<i>Entamoeba histolytica</i>	Disenteria amebiana
<i>Giardia lamblia</i>	Giardíase
HELMINTOS	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariíase
<i>Trichuris trichiura</i>	Tricuríase
<i>Ancilostoma duodenale</i>	Ancilostomíase

Fonte: WEF (1996) apud JORDÃO & PESSÔA (2011)

Segundo Jordão & Pessôa (2011), considerando a dificuldade na identificação desses microrganismos nos laboratórios de saneamento básico, tem-se usado alguns organismos como indicadores de contaminação, como é o caso dos Coliformes Totais, Coliformes Fecais (também conhecidos como Coliformes Termotolerantes) e dos Enterococos (assim como os coliformes fecais, sempre presentes em fezes dos animais de sangue quente).

Dentre os agentes patogênicos presentes a maior preocupação é com os parasitas intestinais (ovos de helmintos e cistos de protozoários), devido a alta frequência de helmintos na população, longo tempo de sobrevivência dos ovos de helmintos no meio externo e sua baixa dose infectante (um ovo de cisto é o suficiente para infectar o hospedeiro) (ANDREOLI, 2001).

Alguns processos de tratamento do lodo que podem ser empregados para o controle de patógenos são: compostagem, tratamento térmico, pasteurização, digestão aeróbia, digestão anaeróbia, radiação gama, radiação beta, e uso de cal (caleação) (ANDREOLI, 2001).

Segundo Andreoli (2001), dentre os processos de higienização do lodo, as alternativas mais econômicas são: caleação, compostagem e tratamento térmico.

A caleação é um método com grande potencial de consolidação no processo de desinfecção e muito utilizado para o uso do lodo na agricultura. O processo consiste na mistura de cal em proporções que variam de 30% a 50% do peso seco do lodo. O método tem por princípio a elevação do pH a níveis iguais ou superiores a 12, o que inativa ou destrói a maior parte dos patógenos do lodo associada ao calor gerado pelas reações químicas de hidratação da cal.

De acordo com Jordão & Pessôa (2011), o processo da estabilização alcalina (caleação), pode ser realizado adicionando cal ao lodo já desidratado, ao lodo cru ou através da utilização de outras tecnologias. Destas, o processo mais usual é o da adição da cal ao lodo já desidratado, misturando os dois componentes em uma tremonha apropriada. O uso da cal virgem é o mais apropriado, pois a reação com o lodo desidratado com teor de sólidos entre 25% e 30% pode

umentar a temperatura em mais de 20°C, até 50°C, de acordo com a dosagem aplicada, e assim mais rapidamente inativar microrganismos e ovos.

O princípio higienizador da compostagem é a eliminação ou redução dos microrganismos patogênicos pela elevação da temperatura obtida com o processo de biodegradação da matéria orgânica. Os fatores mais importantes que influem na degradação da matéria orgânica são a aeração, os nutrientes, a umidade e também a temperatura, no que diz respeito a rapidez no processo de biodegradação e a eliminação de patógenos. Já o processo de tratamento térmico, associa a desidratação do lodo ao uso da energia solar e/ou ao calor, proporcionando outras fontes como, por exemplo, o biogás (ANDREOLI, 2001).

Segundo Andreoli (2001), dentre os diversos agentes capazes de promover a desinfecção do lodo, três fatores se destacam: o pH, a temperatura e a radiação solar.

O pH é considerado um importante agente de desinfecção, pois quando expostos a níveis extremos de pH, os microrganismos patogênicos tendem a ser destruídos. A temperatura, por meio da radiação solar ou outra fonte energética, é bastante eficaz contra os helmintos, pois a temperatura faz com que as enzimas principalmente a albumina, que faz parte da constituição dos microrganismos, diminuam ou percam totalmente a capacidade funcional.

A rigor, quanto mais elevada a temperatura, mais rápida será a eliminação de patógenos. De acordo com Andreoli (2001), a elevação da temperatura acima de 55°C é fundamental para a boa eliminação de patógenos: a 60°C, a eliminação de coliformes fecais é seis vezes mais rápida que a 55°C. A temperatura de 60°C alia boa eficiência de eliminação de patógenos à alta taxa de biodegradação da matéria orgânica.

Assim, a temperatura e o tempo de exposição do lodo de esgoto estão diretamente relacionados à redução do número de ovos de helmintos viáveis, contribuindo para a melhoria das condições sanitárias do lodo. Na Tabela 2.3 são apresentados a temperatura e o tempo necessário para a destruição dos

organismos patogênicos encontrados no lodo de esgoto segundo EPA (*Environmental Protection Agency*).

Tabela 2.3: Temperatura e tempo de manutenção para a destruição de alguns organismos

Organismo	Tempo (minuto)	Temperatura (°C)
<i>Salmonella typhosa</i>	Instantâneo 30	55 a 60 46
<i>Salmonella spp.</i>	15 a 30 60	60 55
<i>Shigela</i>	60	55
<i>Escherichia coli</i>	5 15 a 20 60	70 60 55
<i>Estomoeba histolytica (cistos)</i>	Instantâneo	68
<i>Taenia saginata</i>	5	71
<i>Trichinella spiralis (larvas)</i>	Instantâneo 60	62 a 72 50
<i>Necator americanos</i>	50	45
<i>Brucella abortus</i>	50	45
<i>Streptococos fecais</i>	60	70
<i>Coliformes fecais</i>	60	70
<i>Ascaris spp. (ovos)</i>	60 7	55 60

Fonte: EPA (1985) *apud* Andreoli (2001)

2.1.2.3. Poluentes orgânicos

A preocupação com compostos orgânicos perigosos está associada ao potencial de carcinogenicidade, mutagenicidade, teratogenicidade e risco substancial à saúde humana.

As principais fontes de compostos orgânicos são: indústria química, de plásticos, produtos mecânicos, farmacêuticas, ferro e aço, petróleo, lavanderias, postos de gasolina e indústrias da madeira. Os poluentes mais comuns nos efluentes industriais são: cianeto, fenol, cloreto de metileno, tolueno, etilbenzeno, tricloroetileno, clorofórmio, naftaleno, acroleína, xileno, cresóis, acetofenoma, anilina, acetato de etila, entre outros (CESÁRIO SILVA *et al*, 2001 *apud* SANTOS, 2003).

A presença destes componentes é função da qualidade do esgoto bruto e do sistema de tratamento. A maioria das estações de tratamento é concebida em termos de remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos (SS) e organismos patogênicos, não mencionando a remoção de poluentes orgânicos perigosos.

Segundo Jordão & Pessôa (2011), o Brasil é signatário da Convenção de Estocolmo, que em 2001 estabeleceu medidas de controle relacionadas a produção, importação, exportação, disposição, e ao uso de um grupo de 12 substâncias classificadas como POPs – Poluentes Orgânicos Persistentes. São eles: Aldrin, Clordano, DDT, Dieldrin, Dioxinas, Endrin, Furanos, Heptacloro, Hexaclorobenzeno, Mirex, PCBs e Toxafeno. Limites máximos admitidos para estes POPs foram incorporados ao padrão federal de 2004 de potabilidade da água, e a literatura técnica já identifica concentrações limites para que os processos biológicos de tratamento de esgotos se mantenham estáveis.

2.1.3. Disposição final do lodo de esgoto

Existe uma preocupação crescente com relação à disposição do lodo de esgoto, em decorrência da ampliação dos sistemas de tratamento e das leis ambientais, que a cada dia tornam-se mais exigentes. Por apresentar em sua composição metais pesados, microrganismos patogênicos e outros compostos tóxicos, mesmo após o processo de tratamento, o lodo quando disposto de maneira inadequada, pode trazer danos ao meio ambiente e à saúde humana.

Segundo Jordão & Pessôa (2011), entre as soluções possíveis para disposição final do lodo de esgoto pode-se relacionar: a disposição em aterros sanitários, incineração, usos agrícolas, reuso industrial e lançamento em oceano. O lançamento no mar já foi proibido em vários países, por causar um grande impacto ambiental, alterando a vida aquática e trazendo danos futuros à saúde humana através da ingestão de peixes contaminados.

A Tabela 2.4 apresenta os principais meios de destinação dos lodos de alguns países.

Tabela 2.4: Principais meios de destinação do lodo de esgoto

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

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

No Brasil, grande parte do lodo produzido tem como destino final o aterro sanitário, sendo denominado “codisposição”, uma vez que o lodo é disposto juntamente com os resíduos sólidos domiciliares (JORDÃO & PESSÔA, 2011).

Para este tipo de destinação é necessário que o teor de sólidos do lodo seja de pelo menos 30%, visto que teor de sólidos inferior a este valor dificulta ou impede a própria compactação e o trabalho das máquinas sobre o aterro.

Segundo Lucena (2012), a solução usual de enviar o lodo de esgoto para aterros sanitários, é cara e perigosa. A adequação e a disposição do lodo podem representar até 60% dos custos de uma estação de tratamento de efluentes. Estima-se que em grandes centros, a tonelada de lodo depositada em aterros custe entre R\$ 80,00 e R\$ 120,00 (ZAPAROLLI, 2014).

Para a disposição em aterro sanitário é necessário um planejamento adequado: escolha de local apropriado, projeto bem elaborado e monitoramento do aterro mesmo após o seu fechamento. Caso contrário, diversos impactos ambientais podem ocorrer, tais como: a poluição das águas subterrâneas e superficiais em função da lixiviação e escorrimentos de líquidos percolados que podem conter substâncias tóxicas, e a poluição do ar através da produção de gases nos aterros e no solo (ANDREOLI, 2001).

A alternativa de distribuição do lodo para áreas de produção agrícola é altamente recomendada. Conforme mostrado na Tabela 2.4, alguns países como

França, Espanha, Itália e Alemanha utilizam 50% ou mais da produção do lodo para fins agrícolas, enquanto o Brasil dispõe apenas 5%.

A industrialização do lodo, transformando-o em fertilizante organomineral ou composto, torna esta solução atrativa aos hortifruticultores, desde que o custo e a qualidade do produto oferecido sejam compatíveis com os dos condicionantes de solo e fertilizantes comerciais. Deve-se, portanto, analisar a qualidade do lodo gerado, em particular em relação à presença de metais pesados e agentes patogênicos, os custos de implantação e operação da usina de produção do fertilizante ou de composto, os custos finais e a viabilidade de colocação do produto no mercado consumidor (JORDÃO & PESSÔA, 2011).

A incineração é o processo que oferece maior redução do volume do lodo para disposição final. O processo implica na destruição das substâncias orgânicas presentes no lodo através de combustão, obtida na presença de excesso de oxigênio. Os sólidos voláteis são convertidos em gás carbônico e água na presença de oxigênio, e os sólidos fixos são transformados em cinza.

Observa-se na Tabela 2.4, que o Japão é o país que mais incinera este resíduo, apresentando percentual na ordem de 80%. Alguns países da Europa também adotam este procedimento, porém em percentagens menores.

Embora as questões de falta de área para disposição final parecem estar ligadas aos países com pequena extensão territorial, cabe ressaltar que nos países com grandes áreas, sejam eles desenvolvidos ou não, nas suas grandes metrópoles também não existe espaço para disposição destes resíduos, como no caso dos EUA que incinera cerca de 30% do lodo gerado.

Na incineração, apesar dos microrganismos patogênicos e compostos orgânicos serem eliminados, os metais pesados continuam presentes na cinza, tornando-se necessária uma disposição final adequada para a mesma. Uma disposição inadequada das cinzas pode acarretar a lixiviação dos metais presentes nas cinzas e estes serem absorvidos posteriormente pelas plantas (FONTES, 2003).

Quanto ao controle na emissão de poluentes para a atmosfera, este pode ser obtido através da otimização do processo de combustão e da utilização de

sistemas de filtros antes dos gases serem liberados para a atmosfera. Existem atualmente dois tipos de incineradores em uso para o tratamento de lodos de esgotos: incinerador de múltiplos estágios e incinerador de leito fluidizado.

O tipo de incinerador que vem sendo mais utilizado é o de fornos de múltiplos estágios, devido à eficiência, alta capacidade de incinerar e possibilidade de controle da emissão de gases na atmosfera (ACE PLAN, 1990 apud GEYER, 2001).

2.1.4. Uso benéfico do lodo de esgoto

Diferentes formas de reciclagem do lodo de esgoto como materiais de construção estão sendo sugeridas internacionalmente como alternativas seguras: para o encapsulamento dos metais pesados, redução de emissões atmosféricas poluentes, redução dos volumes requeridos em aterros sanitários e conseqüentemente redução de custos.

Duarte (2008) estudou a incorporação de lodo de esgoto na indústria cerâmica como alternativa sustentável para a disposição final do resíduo. Para determinar o percentual máximo de lodo de esgoto que pode ser incorporado à massa cerâmica, o experimento consistiu na fabricação de tijolos em escala real contendo teores de 0% a 40% de lodo. As avaliações técnicas permitiram concluir que a adição de lodo acarreta perda significativa da massa dos tijolos e que a absorção de água nos tijolos está significativamente ligada ao aumento da dosagem do lodo. Além disso, o autor constatou que a resistência à compressão foi significativamente diminuída com a adição de lodo. O autor, concluiu que a dosagem máxima de lodo que atende os requisitos técnicos e ambientais é de 20%.

No Japão, existem fábricas de blocos usando apenas cinza de lodo incinerado, sem nenhum aditivo. (OKUNO e TAKAHASHI, 1997 *apud* SANTOS, 2003). As fábricas fazem parte das ETEs e pertencem ao Governo Metropolitano de Tóquio, e parte dos blocos é utilizada para os serviços públicos da cidade. Quanto à parte comercializada, o custo do bloco é o mesmo do bloco concorrente de mercado, cerca de um dólar. Porém, o custo da fabricação deste é de dois dólares,

esta diferença segundo o Governo de Tóquio é muito vantajosa diante dos custos de disposição (OKUNO e YAMADA, 2000 *apud* SANTOS, 2003).

A utilização da cinza de lodo de esgoto na produção de concretos e argamassas tem sido investigada por diversos pesquisadores em todo mundo. No Brasil, esta opção foi estudada por Geyer (2001) e Fontes (2003), que concluíram, em seus trabalhos, que a utilização da cinza de lodo de esgoto em concretos é uma alternativa benéfica do ponto de vista ambiental e técnico: consegue encapsular na matriz cimentícia um resíduo que pode ter em sua composição substâncias que são consideradas nocivas ao meio ambiente e à saúde pública, consegue melhorar as propriedades físicas e mecânicas bem como reduzir o consumo de cimento Portland nas misturas.

Na pavimentação, o uso do lodo de esgoto também vem sendo pesquisado. A construção de rodovias é particularmente propícia a esta finalidade, de local de destinação do resíduo, tendo em vista a particularidade de permitir certo encapsulamento e contenção dos produtos por combinação com outros materiais usuais de construção das camadas do pavimento e utilizar grandes volumes.

No entanto, como diz Ubaldo *et al.* (2010) , para que o pavimento não seja usado somente como local de descarte de resíduos, resolvendo apenas questões ambientais, é preciso mostrar quais as vantagens de se usar o resíduo sob o ponto de vista da melhoria da pavimentação, e não somente a sua contribuição para a natureza.

Durante o desenvolvimento da revisão bibliográfica do presente estudo, foram encontrados trabalhos internacionais utilizando lodo de esgoto na pavimentação (AL SAYED *et al*, 1995; SATO *et al*, 2013) e também trabalhos nacionais (LUCENA, 2012; PEREIRA, 2012 e MEDEIROS, 2006).

Lucena (2012) estudou a aplicação da técnica de estabilização/solidificação para resíduos de lodo de esgoto em mistura com solo para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos. Foram realizados ensaios de caracterização das propriedades físicas de cada componente da mistura, ensaio piloto e caracterização mecânica das misturas. Com base nos resultados

obtidos no Experimento Piloto, foi adotado o percentual de 10% para incorporação do lodo de ETE na mistura, e optou-se por testar a adição de cal, cimento ou emulsão asfáltica como estabilizantes, nos teores de 2%, 4%, 6% e 8%. A adição de 8% de cimento ao lodo de ETE ofereceu melhores resultados dentre os teores e estabilizantes estudados. De forma geral, os constituintes indesejáveis que apresentavam concentrações superiores aos recomendados pela NBR-10004/2004 tiveram seus valores reduzidos após o processo de estabilização química e solidificação. A autora concluiu que o uso da técnica de estabilização/solidificação do lodo, com aplicação em base e sub-base de pavimentos, apresentou resultados mecânicos, ambientais e econômicos satisfatórios.

Pereira (2012) estudou a estabilização química de solo com cimento e uso da 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. As moldagens dos corpos de prova para ensaio de compactação do solo-cimento foram nas energias normal, intermediária e modificada, e os teores de cimentos adicionados ao solo foram de 3%, 6% e 9%. O traço utilizando 91% de solo e 9% de cimento na energia intermediária foi o escolhido para a adição de cinza. Os percentuais de cinza utilizados foram de 5%, 10%, 20% e 30%. Pelos resultados obtidos, o autor verificou que todos os traços contendo a cinza obtiveram incremento de resistência a compressão simples, que pode ser atribuído ao fato da cinza ter características pozolânicas.

Medeiros (2006) avaliou o comportamento de misturas asfálticas substituindo parcialmente os agregados convencionais por lodo de tanque séptico. O lodo de tanque séptico originou duas matérias-primas denominadas de lodo in natura e lodo calcinado. O lodo in natura foi utilizado como agregado miúdo e o lodo calcinado como um fíler. Dos resultados obtidos, viu-se que as misturas com adição de lodo in natura não apresentaram desempenho satisfatório quanto à susceptibilidade a umidade. As misturas com lodo calcinado apresentaram comportamento semelhante às misturas com cimento. No entanto, apresentaram melhor desempenho quanto à estabilidade e à relação de resistência a tração com e sem condicionamento. A mistura com 1% de lodo calcinado foi a que apresentou

melhor desempenho. Os resultados ambientais tanto dos resíduos, como dos corpos de prova não apresentaram risco ambiental.

A presente pesquisa tem como objetivo contribuir aos estudos de utilização de lodo de esgoto na pavimentação, com a finalidade de verificar se é uma solução viável mecanicamente e ambientalmente nas condições testadas nesta dissertação, dando um destino sustentável a este resíduo.

2.1.5. Legislação ambiental

Não existe ainda no Brasil uma legislação que regulamente o uso do lodo de esgoto para pavimentação. Contudo, a NBR 10.004/2004 pode fornecer os parâmetros do risco ambiental deste tipo de destinação.

A norma técnica NBR 10.004/2004, é responsável por classificar os resíduos sólidos em diferentes níveis de periculosidade, considerando possíveis riscos ambientais e à saúde pública. Segundo esta norma, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de esgoto são definidos como resíduos sólidos, portanto, devem ser tratados e dispostos dentro dos critérios nela definido.

De acordo com a NBR 10.004/2004, os resíduos de Classe I – denominados como Perigosos são aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem apresentar risco à saúde pública e/ou riscos ao meio ambiente quando não ocorrer seu correto gerenciamento. Entre os aspectos que conferem periculosidade ao resíduo são descritos: a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Os Resíduos Classe II denominados como Não Perigosos podem ser classificados como Resíduo classe II A – Não Inerte e Resíduo classe II B - Inerte.

Os Resíduos da Classe II A - Não Inerte - são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos da classe I – Perigosos ou aqueles que não fazem parte dos resíduos da Classe II B - Inertes. Podem ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

O Resíduo da classe II B – Inerte – é aquele que quando amostrado de forma representativa, segundo a ABNT/NBR 10007/2004 e submetido a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT/ NBR 10006/2004 não obtém nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se: aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Além desta norma, pode-se também citar a Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006 (Conama), que estabelece critérios e procedimentos para o uso em áreas agrícolas de lodo de esgoto gerado em ETEs e seus produtos derivados. Os anexos desta Resolução indicam os parâmetros que devem ser determinados para caracterizar o potencial agronômico (como carbono orgânico, fósforo total, formas de nitrogênio, etc.) para caracterizar a presença de substâncias inorgânicas e orgânicas (como arsênio, bário, etc.), para caracterizar quanto a presença de agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos (no caso, apenas coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *salmonella* e vírus entéricos), e para caracterizar a estabilidade do lodo (no caso a relação SV/ST deve ser inferior a 0,7).

A Resolução 375 classifica o bioestabilizado segundo duas classes, A e B (Conama, 2006):

- Classe A: os bioestabilizados enquadrados nesta classe são de uso irrestrito. O objetivo implícito da categoria Classe A é a redução da quantidade de patogênicos para níveis abaixo da quantidade mínima detectável, incluindo a análise de Coliformes Fecais, Salmonella, vírus, helmintos e protozoários. Para a redução da quantidade de patógenos segundo os níveis apresentados para a Classe A, devem ser empregadas tecnologias de redução avançada de patogênicos, como as apresentadas na Tabela 2.5. Esta tabela mostra também densidades máximas de organismos admitidas segundo o critério de classificação da legislação.
- Classe B: o lodo de classe B tem seu uso restrito ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação

mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação. A Classe B objetiva assegurar que a quantidade de organismos patogênicos encontra-se reduzida para níveis não comprometedores da saúde pública e do meio ambiente. De qualidade menos restritiva, é somente caracterizado através de coliformes fecais e ovos de helmintos. Para obtenção do lodo Classe B é proposto o emprego de tecnologias como as apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Classes do lodo de esgoto segundo a densidade admissível de patogênicos e processos de tratamento recomendados (CONAMA, 2006)

Classificação	Densidade admissível	Processo/tratamento
Lodo Classe A	Coliformes termotolerantes < 10 ³ NMP/g ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo/g ST Salmonella ausência em 10g ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF/g ST	Compostagem Secagem Térmica Tratamento Térmico Digestão aeróbia termofílica Irradiação Pasteurização
Lodo Classe B	Coliformes termotolerantes < 10 ⁶ NMP/g ST Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos/g ST	Digestão aeróbia Secagem em leitos Digestão anaeróbia Compostagem Estabilização com cal

(*) Siglas: NMP/gST: Número Mais Provável por grama de sólidos totais

UFF ou UFP/gST: Unidades Formadoras de Foco ou de Placa por grama de Sólidos Totais

Independente da Resolução 375 ser referente ao uso do lodo diretamente em solo agrícola, esta pode também ser uma referência para este trabalho, em relação ao julgamento da presença dos agentes patogênicos para uso em pavimentação.

2.2. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Na pavimentação, os solos constituem o subleito e também são empregados para a construção das camadas de base e sub-base. Entretanto, é comum que o solo do local da estrada não preencha total ou nem mesmo parcialmente as exigências do projeto geotécnico. Nestes casos, normalmente, uma

das soluções mais comuns é a procura por outros materiais, diferentes dos locais, que preencham os requisitos técnicos mínimos, o que ocasiona custos adicionais, como por exemplo, de transporte, que muitas vezes podem inviabilizar o projeto.

Uma alternativa é a estabilização dos solos locais, com materiais alternativos, que pode se mostrar mais favorável e menos onerosa. Segundo Medina e Motta (2004), a estabilização de solos visa modificar propriedades de engenharia como, por exemplo: a resistência ao cisalhamento, tornando-o menos sensível às mudanças ambientais e compatível com as cargas atuantes na estrutura; a permeabilidade, aumentando-a ou diminuindo-a; e a compressibilidade, reduzindo-a.

Pode-se citar três métodos de estabilização de solos: estabilização mecânica, estabilização granulométrica e estabilização química. A escolha por um ou outro tipo de estabilização é influenciada pelo custo, finalidade da obra, e em particular, pelas características dos materiais e propriedades do solo que devem ser corrigidas.

A estabilização mecânica consiste em aplicar uma carga ao solo, por meio de compactação de forma a diminuir os espaços existentes entre os grãos sólidos. Pela compactação, a intimidade de contato dos grãos aumenta, diminuindo o índice de vazios, o que promove melhoria da resistência, rigidez e da impermeabilidade do solo compactado (PINTO, 2002).

Já a estabilização granulométrica corresponde na mistura de um ou mais solos, de forma que resulte em uma mistura com resistência garantida pelo contato grão a grão das partículas maiores, ao mesmo tempo em que os vazios entre estas partículas sejam ocupados por um material mais fino, a fim de garantir maior densidade e menor permeabilidade (GONDIM, 2008).

Os materiais estabilizados quimicamente são aqueles que recebem a adição de cimento, cal ou outro tipo de aglomerante, com a finalidade de proporcionar acréscimo significativo na rigidez do material natural e das resistências a compressão e a tração. Os mais comumente empregados na

pavimentação são os seguintes: solo-cal, brita graduada tratada com cimento (BGTC), solo-cimento e solo melhorado com cimento (BERNUCCI *et al*, 2008).

2.2.1. Solo-cal

O uso da cal é especialmente recomendado para melhoria de solos argilosos ou muito siltosos, que apresentem em geral plasticidade e expansão elevadas, além de baixa capacidade de suporte (SANTOS, 2004). O tratamento da cal pode ser classificado em:

- Solo melhorado com cal: quando se busca somente melhorar algumas propriedades dos solos consideradas prejudiciais para a pavimentação, como por exemplo, a expansibilidade, umidade excessiva e alta plasticidade;
- Solo estabilizado com cal: quando a necessidade é estrutural, o processo visa o aumento da resistência e rigidez do solo, que ocorre em função do desenvolvimento, em longo prazo, das reações pozolânicas.

Segundo Guimarães (2002), a cal utilizada na estabilização ou melhoria dos solos é o produto resultante da calcinação, em temperaturas próximas de 1000°C de rochas carbonatadas cálcicas e magnesianas existentes na superfície terrestre. Os tipos de cales mais empregados são: cal hidratada Ca(OH)_2 ; cal dolomítica monohidratada - $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{MgO}$; cal virgem - CaO e cal dolomítica virgem - $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$. Estes produtos se diferenciam pela rocha de origem e pelo processo de fabricação (calcinação), sendo em geral mais utilizada a cal cálcica hidratada para fins rodoviários por ser mais eficiente na combinação com o solo.

Guimarães (2002) descreve os quatro tipos básicos de reações que ocorrem em misturas solo-cal: troca catiônica, floculação-aglomeração, reações pozolânicas e carbonatação.

A troca catiônica e a floculação processam-se rapidamente e produzem alterações imediatas nas propriedades físicas do solo. Segundo Fossberg & Greg (1963) *apud* Guimarães (2002), quando a cal é adicionada ao solo o fenômeno de troca de bases ocorre com os argilominerais. Essa reação leva a floculação das

partículas argilosas, causando o aumento no ângulo de atrito da massa do solo. Isto se manifesta na diminuição no limite de liquidez e no índice de plasticidade, na redução dos valores de contração e expansão, e também na diminuição da massa específica aparente seca máxima e aumento da umidade ótima.

Outra reação que pode ocorrer durante a estabilização de um solo com a adição de cal é a carbonatação. De acordo com Guimarães (2002), esta reação também apresenta características de ação imediata e é de alta importância para a ocorrência dos objetivos da estabilização.

Na carbonatação o dióxido de carbono presente na atmosfera reage com a cal para formar carbonatos de cálcio ou de magnésio, dependendo do tipo de cal hidratada (calcítica ou dolomítica). A reação de carbonatação é uma reação indesejável que ocorre com gás carbônico do ar, e nas minúsculas bolhas gasosas absorvidas pela mistura, refazendo o carbonato primitivo, resultando em uma expansão de volume. A carbonatação é prejudicial na medida em que diminui a formação de silicatos cimentantes (Parodi, 1980 *apud* Santos, 2004). Por ser uma reação que depende do contato do material com o ar, pode ser impedida pela compactação imediata da camada, logo após a execução da mistura solo-cal.

A reação pozolânica se processa em longo prazo, resultando na formação de vários compostos cimentantes, que aumentam a resistência e a durabilidade da mistura solo-cal. Quando uma quantidade suficiente de cal é adicionada ao solo, que tem em geral pH entre 4,5 e 6,5, ocorre uma elevação do pH passando para 11 - 12, e são criadas as condições alcalinas nas quais os minerais da fração argila e até mesmo o quartzo podem reagir com a cal formando aluminatos, silicatos e aluminosilicatos de cálcio hidratados, em número bastante significativo. Todas estas substâncias têm influência no processo de estabilização pelas suas características cimentícias. Esses minerais neoformados apresentam-se na forma de produtos mais ou menos cristalizados que se associam, constituindo grânulos capazes de conferir ao material uma determinada resistência mecânica (SANTOS, 2004).

De acordo com Eades e Grim (1962) citados por Guimarães (2002), a reação pozolânica é lenta e só se completa alguns anos depois, requer temperatura

de no mínimo 21°C e o mínimo de algumas semanas para sua ocorrência. Além da temperatura, do grau de cristalinidade dos minerais e do teor de água existente no sistema, outros parâmetros como o tipo de argila, as condições climáticas, a presença de matéria orgânica e sulfatos aparecem como fatores que influenciam na reação cal/solo.

A presença de matéria orgânica influencia no processo de estabilização, retardando as reações, e produzindo pequenos ganhos de resistência. Segundo Castro (1995), sua avidéz pelo hidróxido de cálcio é capaz de bloquear toda a interação desse composto com os minerais do solo forçando a utilização de grande quantidade de estabilizante, o que inviabiliza economicamente o processo de geopolimerização (estabilização).

Os fatores que determinam a quantidade de estabilizante a ser adicionado no solo, é a quantidade de cálcio suficiente para que se desenvolvam as trocas catiônicas, floculação e aglomeração, assim como o desenvolvimento da resistência pretendida (LUCENA, 2012).

Castro (1995) em sua tese de doutorado desenvolveu um método físico-químico expedito baseado na adsorção de cal, capaz de quantificar a reatividade superficial e indicar a susceptibilidade de um solo a estabilização. Foram identificados os possíveis modos de interação química entre o hidróxido de cálcio e a paragênese dos solos bem como a relação entre a reatividade e os seus parâmetros de superfície. O autor concluiu que a reatividade da fração ativa de solos sesquioxídicos varia muito pouco, o que conseqüentemente obriga a que cada caso seja tratado diferencialmente de acordo com as características do solo, bem como da aplicação final do material.

Entre os métodos de dosagem de cal para estabilização de solos podem ser citados, segundo LOVATO (2004):

- Método do pH (Eades e Grim, 1966): consiste na determinação do teor mínimo de cal que produza aumento no valor de pH para 12,4.

- Método do ICL (*Initial Consumption of Lime*) – proposto por Rogers *et al* (1997), é uma variação do Método do pH, onde o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor constante (máximo).
- Método do *Lime Fixation Point* (Hilt e Davidson, 1960) – baseado no limite de plasticidade, que determina o teor de cal máximo que proporciona melhoria na trabalhabilidade, sem ganhos significativos de resistência;
- Método de Thompson (1966) – que define como reativo um solo que apresente um aumento de resistência a compressão simples de pelo menos 345kPa, quando estabilizado com cal.

Além desses métodos, deve-se avaliar o comportamento mecânico da mistura solo-cal, através de ensaio triaxial de cargas repetidas ou outro ensaio mecânico, que serão os fatores decisivos na escolha do teor de cal.

2.2.2. Solo-cimento

O cimento é um dos estabilizantes mais conhecidos e aplicados na estabilização química de solos. A ação cimentante nos grãos do solo ocorre por meio de reações de hidratação e hidrólise, que estabelecem ligações mecânicas e químicas entre o cimento e a superfície rugosa dos grãos do solo, sendo mais ativa quanto maior for o número de contato entre o solo e as partículas de cimento (LUCENA, 2012).

Segundo a Norma DNIT 143/2010-ES (DNIT, 2010), define-se solo-cimento como material proveniente da mistura de solo, cimento e água, em proporções previamente determinadas por processo próprio de dosagem em laboratório, de forma a apresentar determinadas características de resistência e durabilidade.

A principal diferença entre as misturas solo-cimento e solo-cal consiste na velocidade de aumento de resistência observada nos dois processos, nas misturas solo-cimento a resistência cresce bastante em curto espaço de tempo, enquanto

nas misturas solo-cal, os resultados são distribuídos ao longo de um tempo de cura maior.

Segundo Enamorado (1990) *apud* Macêdo (2004), os fatores mais importantes que afetam a resistência no solo cimento são:

- a) Tipo de solo: se o solo é bem graduado, são numerosas as áreas de contato produzindo uma ação cimentante mais forte. Solos com percentual muito alto de argila pode exigir um teor muito alto de cimento e ficar muito oneroso, além de apresentar muita retração.
- b) Teor de cimento: o cimento mais utilizado na estabilização de solos é o cimento Portland. A resistência da mistura solo-cimento cresce linearmente com o teor de cimento, para um mesmo tipo de solo. A escolha do teor de cimento dependerá do tipo de solo, quanto mais fino for o solo, maior será o teor de cimento exigido.
- c) Densidade seca máxima e umidade ótima: as misturas exigem um teor de umidade que conduza a uma massa específica seca máxima, para uma dada energia de compactação. O acréscimo de cimento ao solo tende a produzir um ligeiro acréscimo no teor de umidade e pequeno decréscimo na massa específica aparente seca máxima, devido a ação flocculante do cimento.
- d) Tempo e temperatura de cura: a resistência aumenta gradualmente com o período de cura, dos 28 dias aos 90 dias as resistências máximas são alcançadas, em período maior que 90 dias os ganhos de resistência são desprezíveis. Temperaturas elevadas produzem incremento de resistência, mas a secagem em excesso pode também produzir fissuramento ou ruptura.
- e) Demora na compactação: é a maior causa de perda de resistência do solo-cimento. Com a demora ocorre o endurecimento da mistura dificultando uma boa compactação e a densidade final alcançada é menor. No campo, o uso de agentes retardadores de pega pode diminuir esta perda de resistência que acontece na demora da compactação.

Dentre os métodos de dosagem de solo-cimento, pode-se citar: Método de dosagem da ABNT e Método Físico-Químico desenvolvido na COPPE pelo Prof. Francisco José Casanova de Oliveira e Castro e descrito em Casanova *et al* (1992).

2.3. ESTABILIZAÇÃO/SOLIDIFICAÇÃO

A estabilização/solidificação ou encapsulamento é um estágio de pré-tratamento pelo qual os constituintes perigosos de um resíduo ou solo contaminado são transformados e mantidos em suas formas menos solúveis ou tóxicas confinados em cápsulas, partículas ou blocos. As transformações ocorrem via reações químicas que fixam elementos ou compostos tóxicos, em polímeros impermeáveis ou cristais estáveis, chamados encapsulantes. Assim estabilizados, ficam menos agressivos ao meio ambiente (CORDEIRO, 2007).

Os reagentes adicionados aos contaminantes para gerar a estabilização e solidificação podem ser orgânicos ou inorgânicos. Os reagentes orgânicos raramente são empregados. Os inorgânicos são amplamente utilizados por reagirem quimicamente com a água presente e com os contaminantes, proporcionando o encapsulamento destes. Citam-se, como exemplo de reagentes orgânicos, as argilas modificadas, e como reagentes inorgânicos, o cimento, a cinza volante, a cal, fosfatos, rejeitos de fornos, entre outros (USACE, 1995).

De acordo com USACE (1995), a técnica de encapsulamento de contaminantes tem como objetivo produzir um estrato solidificado, diminuindo a área superficial e limitando a solubilidade e a transferência do contaminante quando exposto a um fluido lixiviante. O produto final encapsulado varia de acordo com as características do solo contaminado e dos reagentes utilizados, bem como do tipo e quantidade do contaminante presente.

A solidificação/estabilização não é uma forma de tratamento que se justifique para qualquer tipo de resíduo. A decisão técnica e econômica para a escolha desta tecnologia deve ser embasada em dados sobre a quantidade, composição química e propriedades físicas, localização e problemas de disposição associados a um resíduo específico. Resíduos classificados como Perigosos (ou Classe I) e gerados em grandes quantidades são os que comumente justificam esse

tipo de tratamento. Os resíduos perigosos considerados tradicionalmente adequados para o tratamento por solidificação/estabilização têm sido os seguintes (AGOSTINI, 2002):

- resíduos contendo íons metálicos ou semimetais;
- resíduos oleosos e à base de solventes, tais como solventes usados, fundo de tanque de destilação e resíduos de refinarias;
- resíduos aquosos contendo 1% a 20% ou mais de substâncias orgânicas (emulsões), solúveis ou insolúveis, listadas como perigosas pela legislação;
- resíduos aquosos contendo 1% a 20% ou mais de substâncias orgânicas (emulsões), solúveis ou insolúveis, não listadas como perigosas pela legislação.

A tecnologia de estabilização/solidificação era vista até o início da década de 1990 como imprópria para resíduos com altos teores de constituintes orgânicos. Contudo, o desenvolvimento de novos aglomerantes permitiu o tratamento de ampla variedade de compostos orgânicos. Por exemplo, resíduos com 10 a 20% de conteúdo orgânico não eram, até então, recomendados para as tecnologias de Estabilização/Solidificação disponíveis, uma vez que os compostos orgânicos interferem nos processos físico-químicos, que são importantes na pega e endurecimento do cimento e conseqüente fixação dos constituintes do resíduo (AGOSTINI, 2002).

No Brasil, tem-se constatado em diversas pesquisas que a técnica de encapsulamento tem sido explorada com o objetivo de desenvolver a tecnologia, facilitando o entendimento da mesma. Dentre alguns trabalhos na área de pavimentação têm-se as seguintes: AGOSTINI (2002), CORDEIRO (2007), LUCENA (2012) e SANTOS (2010).

2.4. ENSAIOS DINÂMICOS

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas de espessuras finitas, que são solicitados dinamicamente, e sujeitos a cargas de diferentes intensidades e frequências variáveis ao longo do dia e do ano. O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento. A Figura 2.4 apresenta a forma mais comum de representação de um pavimento e as principais deformações e deslocamentos atuantes no interior da estrutura (FRANCO, 2007).

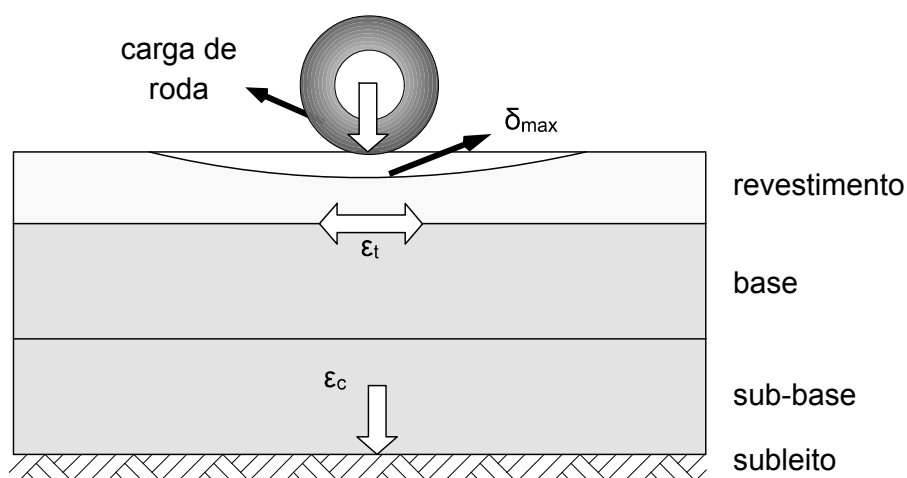


Figura 2.4: Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos de um pavimento asfáltico (FRANCO, 2007)

Segundo Medina e Motta (2005), é corrente a observação de que o defeito mais frequente nos pavimentos flexíveis no Brasil é o trincamento da camada superior de concreto asfáltico pela flexão alternada da camada superficial apoiada em camadas granulares, geralmente bastante deformáveis elasticamente. Motta (1991) relata que, para as condições brasileiras, os defeitos causados pelas deformações permanentes não são expressivos, principalmente devido às condições de dimensionamento tradicionalmente adotadas (Método CBR com imersão em água por quatro dias) e as baixas umidades de equilíbrio.

Os métodos de dimensionamento de pavimentos mais utilizados na atualidade são, ainda, de natureza empírica ou semi-empírica, baseando-se no índice de suporte CBR, relacionado quase que exclusivamente com a resistência ao

cisalhamento dos materiais, e os consequentes afundamentos. Somente métodos de dimensionamento que considerem explicitamente o aspecto tensão-deformação dos materiais que o compõe, sob condições dinâmicas, poderão fornecer um projeto adequado, quanto ao aspecto da perda de funcionalidade do pavimento.

Na abordagem mecanicista, os vários modelos de tensão e deformação são obtidos através de ensaios dinâmicos dos materiais, também conhecidos como ensaios de cargas repetidas. De acordo com Medina e Motta (2005), o ensaio triaxial de cargas repetidas foi introduzido nos estudos de pavimentação pelo Prof. H. Bolton Seed na década de 1950, na Universidade da Califórnia, Berkeley; durante investigação da deformabilidade da pista experimental da AASHTO. No Brasil, este tipo de ensaio foi introduzido em 1977 pela COPPE em conjunto com o IPR. Com o avanço da computação e dos recursos eletrônicos, o equipamento triaxial da COPPE foi totalmente automatizado em 2001, sendo o sistema utilizado atualmente no laboratório de Geotecnia/Pavimentos da COPPE/UFRJ elaborado pelos Engenheiros Ricardo Gil Domingues e Álvaro Augusto Dellê Vianna.

Os ensaios de carga repetida procuram reproduzir as condições de campo. A amplitude e o tempo de pulso dependem da velocidade do veículo e da profundidade em que se calculam as tensões e deformações produzidas (Medina e Motta, 2005).

2.4.1. Módulo de Resiliência

O primeiro estudo de deformabilidade dos pavimentos deve-se a Francis Hveem, em 1955, segundo Medina e Motta (2005). Em 1938, o laboratório do Departamento de Transportes da Califórnia iniciou uma série de medidas em campo dos deslocamentos verticais dos pavimentos causados pela ação da passagem rápida de cargas de rodas. Essas medidas foram realizadas por meio de aparelhos elétricos colocados dentro dos pavimentos. Esse tipo de deslocamento vertical passou a ser denominado de deflexão. A deflexão é um termo aplicado para movimentos verticais transientes, quando o pavimento está sujeito à carga de rodas. Cessada a ação da carga, a deflexão do pavimento é recuperada

rapidamente. O material responde a uma dada sollicitação com um deslocamento. Parcela desse deslocamento é permanente, não recuperável, e parcela é resiliente, recuperável quando cessa a ação da sollicitação, conforme mostrado na Figura 2.5, retirada de Franco (2007).

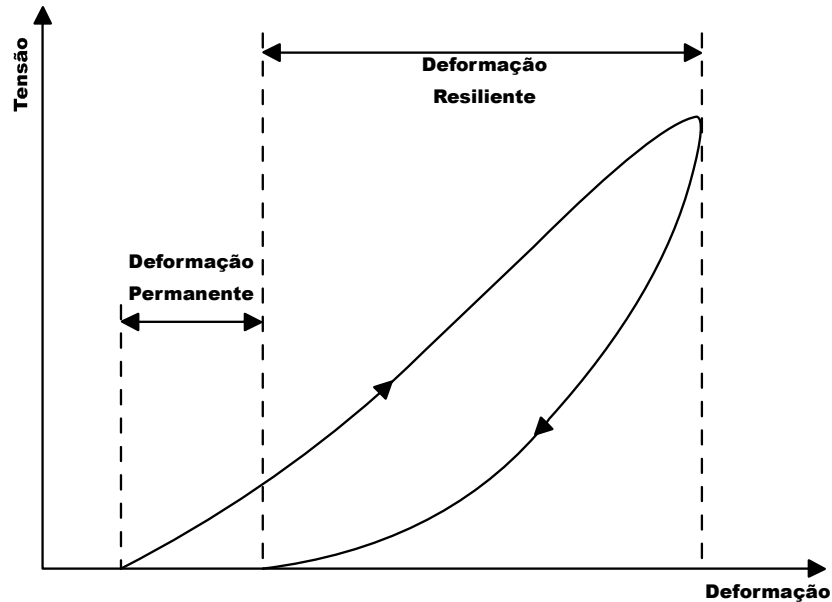


Figura 2.5: Comportamento dos materiais de pavimentação sujeitos a um ciclo de carregamento (FRANCO, 2007)

Segundo Medina e Motta (2005), o módulo de resiliência depende da natureza do solo (constituição mineralógica, textura, plasticidade da fração fina), umidade, densidade e estado de tensões, além das características do próprio ensaio (frequência e tempo de carregamento, forma da onda, etc.). O ensaio faz-se com solos não saturados quase sempre em condições de drenagem livre.

A aplicação de carga é semi-senoidal por se aproximar da forma de carregamento correspondente à passagem de roda. O tempo de duração de aplicação total de carga é de 0,1 segundo e o repouso de 0,9 segundo. São utilizadas diferentes tensões de confinamento σ_3 , dada por pressão de ar dentro da célula, e tensões solicitantes σ_1 , aplicadas por pistão acionado por válvula “treeway” e medida por célula de carga. Uma combinação variada de tensões é normalmente aplicada. Os deslocamentos são medidos por transdutores mecânicos

eletromagnéticos (*linear variable differential transducers*, LVDT), ao longo de uma determinada altura ou espessura do corpo-de-prova.

O módulo de resiliência (MR ou M_R) é definido como a relação entre a tensão-desvio aplicada axial e ciclicamente no corpo de prova e a correspondente deformação específica vertical recuperável, conforme a equação 2.1:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_a} \quad (2.1)$$

Onde:

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão desvio aplicada repetidamente;

σ_1 =tensão principal maior;

σ_3 =tensão principal menor ou tensão de confinamento;

ε_a =deformação específica axial resiliente (recuperável), mm/mm;

No Brasil, o ensaio triaxial de cargas repetidas é regido pela norma DNIT-ME 134/2010– Solos Determinação do Módulo de Resiliência.

O módulo de resiliência é usado como entrada de dados para o cálculo de tensões e deformações nos diferentes pontos do pavimento. Ressalta-se que os materiais de pavimentação não podem ser considerados elásticos lineares, pois dependem principalmente do estado de tensões atuante, decorrente do peso próprio mais as tensões causadas pelas cargas dos veículos (MEDINA e MOTTA, 2005).

Assim, nos ensaios triaxiais de carga repetida, procura-se determinar a relação experimental do módulo em função das tensões aplicadas, genericamente expressa por:

$$M_R = f(\sigma_3, \sigma_d) \quad (2.2)$$

Procura-se determinar o módulo de resiliência para as condições de densidade, umidade e grau de saturação que o solo possa apresentar in situ.

De acordo com Bernucci *et al*(2008), para os solos coesivos, a deformação resiliente axial depende consideravelmente da tensão-desvio aplicada. O módulo de resiliência varia significativamente para baixas tensões-desvio, diminuindo sensivelmente essa variação para maiores tensões-desvio. Portanto, um solo coesivo no subleito, onde as tensões advindas das cargas de rodas já estão bastante reduzidas, apresenta o módulo de resiliência significativamente maior que aquele observado se o material fosse empregado como base de pavimento. Embora o solo possa ser homogêneo, o módulo de resiliência aumentará com a profundidade, pois as tensões-desvio diminuem (Seed *et al.*, 1963 *apud* Bernucci *et al.*, 2008).

Segundo Medina e Motta (2005), um modelo de comportamento do M_R com as tensões, utilizado para solos coesivos foi proposto por Svenson (1980), e é representado pela equação 2.3:

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (2.3)$$

Para os solos granulares, o módulo de resiliência aumenta com a tensão de confinamento e varia muito pouco com a tensão-desvio. Para níveis mais altos de tensão-desvio e baixas tensões de confinamento, a deformação permanente passa a ser excessiva (BERNUCCI *et al.*, 2008). Têm-se assim a seguinte equação:

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (2.4)$$

Além dos comportamentos tipicamente granular e coesivo, há solos que dependem tanto da tensão de confinamento como da tensão desvio, classificando-os como de comportamento composto. A equação que melhor representa este comportamento é o modelo seguinte:

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (2.5)$$

2.4.2. Deformação permanente

A deformação permanente em materiais compactados pode ocorrer devido à ação de uma carga externa, não sendo recuperável quando a mesma for removida. No caso rodoviário, à medida que o pavimento sofre o efeito das cargas transientes do tráfego, todas as camadas do pavimento podem apresentar acúmulo de deformações permanentes, que se manifestam na superfície das rodovias sob a forma de afundamentos plásticos, comumente denominados de afundamentos de trilhas de rodas.

Segundo Yoder e Witczak (1975) *apud* Rezende (2009), a deformação permanente é uma manifestação de dois diferentes mecanismos: da densificação (variação de volume) e de deformações cisalhantes repetidas (deformação plástica sem variação de volume). A deformação permanente decorrente da densificação do solo pode ser muito reduzida se as especificações de compactação forem atendidas, já a deformação cisalhante repetida, ou escoamento plástico, é um mecanismo que se admite no dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Segundo Guimarães (2009), em geral, os fatores que causam uma diminuição da resistência ao cisalhamento de solos e britas tendem a aumentar a deformação permanente quando o material é submetido à ação do tráfego de veículos. Os principais fatores que afetam a deformação permanente em solos são os seguintes:

- Tensão: níveis das tensões, rotação das tensões principais com o deslocamento da carga de roda e história de tensões.
- Carregamento: magnitude, número de aplicações, duração, frequência e sequência de carga.
- Umidade: percentual, permeabilidade do material, grau de saturação e poro-pressão.
- Agregado: tipo de agregado, forma da partícula, granulometria, porcentagem de finos, tamanho máximo dos grãos e massa específica real dos grãos.

Para a determinação das deformações permanentes no solo, o ensaio triaxial de cargas repetidas é realizado no mesmo equipamento para obtenção do módulo de resiliência. Porém, os corpos de prova não são previamente condicionados, pois as deformações permanentes iniciais devem ser consideradas. As amostras dos materiais devem ser preparadas para as condições (temperatura, estado de tensões, umidade, densidade, etc.) esperadas no campo (FRANCO, 2000).

Contudo, não há, no âmbito nacional, qualquer norma técnica que padronize os procedimentos para a realização do ensaio de deformação permanente. Essa ausência de padronização fez com que os pesquisadores estudassem a ocorrência da deformação permanente partindo de diferentes procedimentos, como por exemplo, no que diz respeito ao número total de repetições de cargas a ser utilizado no ensaio.

Motta (1991) indica que deve ser observada a taxa de acréscimos de deformação permanente, e que quando este valor tornar-se próximo a zero (acomodamento), o ensaio pode ser paralisado e não se definir previamente certo número de ciclos, em especial se este for um número pequeno em relação à expectativa do volume de tráfego solicitante.

Os modelos de previsão da deformação específica permanente dos materiais de pavimentação têm sido desenvolvidos a partir de dados obtidos em laboratório, por meio dos ensaios triaxiais de cargas repetidas. O modelo mais comum para a previsão da deformação permanente foi introduzido por MONISMITH *et al.* (1975), que relaciona o número de repetições de carga com a deformação específica permanente, e está apresentado na equação 2.6:

$$\varepsilon_p = A \cdot N^B \quad (2.6)$$

Onde:

ε_p é a deformação específica plástica;

A e B são parâmetros a serem determinados para as condições do ensaio; e

N é o número de repetições de carga em laboratório;

Segundo Franco (2000), pelos ensaios de laboratório, consegue-se para as condições específicas de carregamento e preparação de cada material, obter boas regressões com esse modelo, representando satisfatoriamente o comportamento da deformação permanente em relação apenas ao número de repetições de carga, tanto para solos granulares como para solos argilosos.

Já Guimarães (2001) comenta que o modelo de Monismith pode estimar uma deformação permanente elevada quando comparada com as medidas reais de campo. O autor estudou a deformação permanente de amostras de lateritas de Brasília e uma argila amarela oriunda do Rio de Janeiro, propondo uma adaptação do modelo de Monismith *et al.* (1975), restringindo sua validade a um número de ciclos menores que o denominado N_{SD} , correspondente ao acomodamento das deformações permanentes (*shakedown*). As equações 2.7 e 2.8 ilustram o modelo proposto pelo autor:

$$\varepsilon_p = A \cdot N^B \text{ se } N \leq N_{SD} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_p = C \cdot N + D \text{ se } N > N_{SD} \quad (2.8)$$

Onde:

ε_p – deformação permanente acumulada,

A, B, C e D – parâmetros determinados experimentalmente,

N – número de repetições de carga,

N_{SD} – números de ciclos correspondente ao ciclo de acomodamento.

O modelo expandido proposto por Guimarães (2001) resultou em valores de deformação permanente na ordem de 20,6% e 18,2% menores do que aqueles obtidos com o modelo original de Monismith, para valores de N superiores ao acomodamento ou *shakedown* plástico.

Guimarães (2009) estudou amostras de diferentes granulometrias, englobando de lateritas pedregulhosas a solos finos de diversas regiões do Brasil.

O modelo proposto pelo autor leva em conta, além do N, o estado de tensões e está apresentado na equação 2.9:

$$\varepsilon_p (\%) = \Psi_1 \cdot (\sigma_3)^{\Psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\Psi_3} \cdot (N)^{\Psi_4} \quad (2.9)$$

Onde:

ε_p (%) – deformação permanente específica (em porcentagem),

σ_3 – tensão confinante,

σ_d – tensão desvio,

N – número de ciclos de aplicação da carga,

Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 e Ψ_4 - parâmetros do modelo obtidos experimentalmente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão descritos os procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa e os materiais utilizados. O fluxograma (Figura 3.1) apresenta a sequência das atividades realizadas.

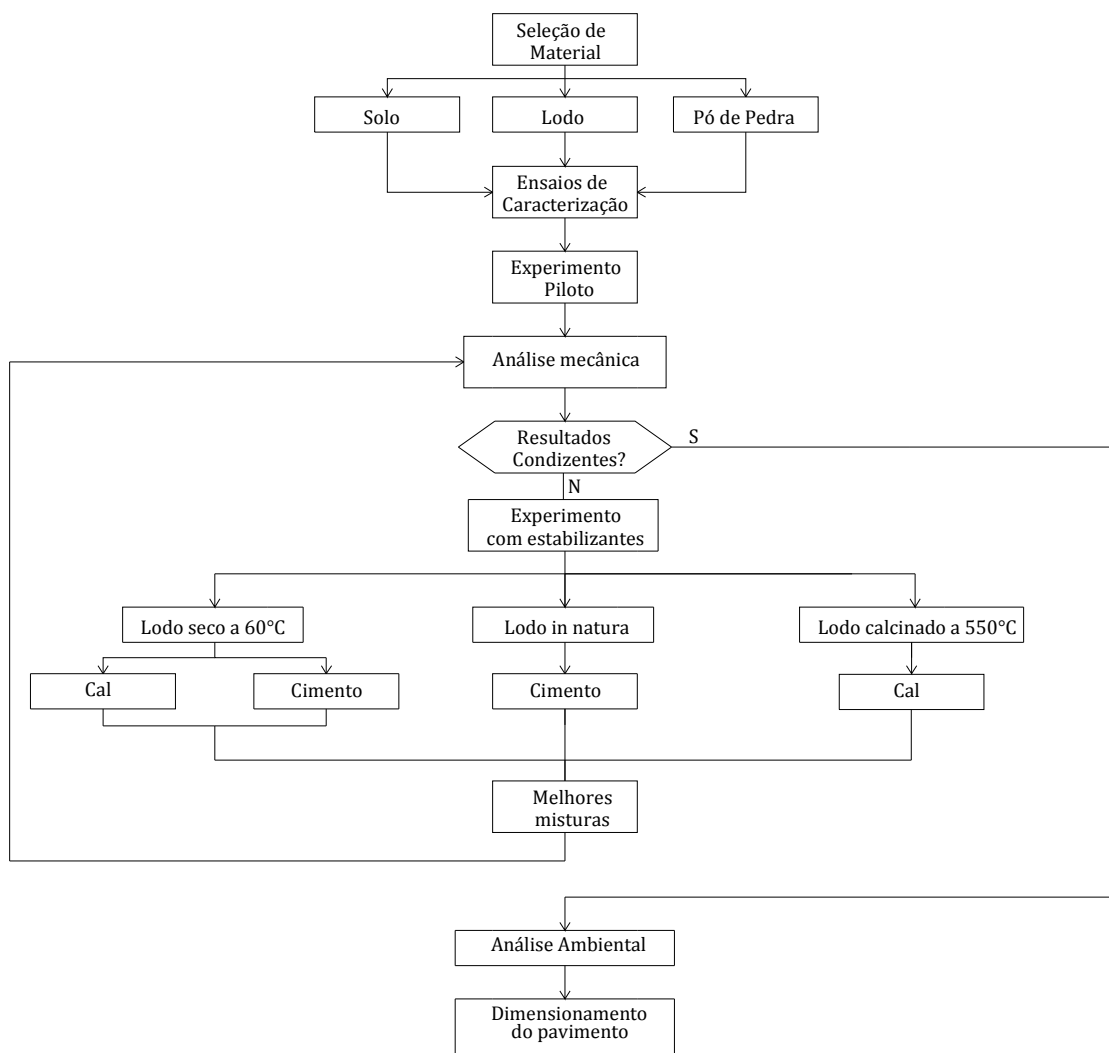


Figura 3.1: Fluxograma das atividades da presente pesquisa

O programa experimental foi dividido em algumas etapas visando o encaminhamento adequado da pesquisa. A primeira etapa consistiu na seleção, coleta e caracterização dos materiais. Em seguida foi realizado um pequeno estudo exploratório de conhecimento de como manipular os materiais, denominado experimento piloto, utilizando três teores de lodo de ETE seco a 60°C de 5%, 10% e 15% com a finalidade de avaliar o comportamento mecânico destas misturas para decidir a continuidade do experimento.

Para qualquer estudo de pavimentos, as opções de materiais são diversas, mas devido a restrições temporais de um mestrado, deve-se, portanto, limitar o número de variáveis no planejamento do experimento. A seleção dos materiais de pavimentação a serem combinados com o lodo seguiu a ideia de ter dois tipos bem distintos de condições: um material mais “universal” e outro mais “regional”, um material que atendesse individualmente as condições para uso como camada de pavimento e outro que não fosse adequado, a facilidade de obtenção das amostras, os tipos de materiais que outros estudos com o lodo já tinham empregado, etc. Assim, ponderando estes fatores com pesos variáveis e arbitrários, chegou-se a dois: um solo típico do Rio de Janeiro de má qualidade e um “pó de pedra” usado de forma corrente pela Prefeitura do Rio de Janeiro como camada de sub-base.

Através dos resultados obtidos da análise mecânica, avaliou-se que estes primeiros resultados não foram condizentes com o esperado, sendo necessário o uso de estabilizantes, como a cal e o cimento. Foram ainda realizadas algumas misturas, utilizando além do lodo seco a 60°C, lodo in natura e lodo calcinado a 550 °C para observar se a questão estava na forma de preparação prévia do lodo.

Após esta fase, foram definidas as misturas e analisados os parâmetros de resistência e deformabilidade, pelo ensaio de Módulo de Resiliência. Para as melhores misturas foram realizados ensaios de deformação permanente e também análise ambiental do resíduo, através de ensaios de lixiviação e de solubilização, segundo a NBR 10.004/2004.

Após todas estas etapas foi utilizado um programa computacional, SisPav, (Franco, 2007), na sua versão de 2013 (SisPavBR) para simular o

dimensionamento de um pavimento típico, com as melhores misturas estudadas compondo a base e a sub-base do mesmo.

Assim, ao final de todas estas etapas, foi possível definir quais foram as melhores opções de combinação, tanto tecnicamente quanto ambientalmente.

3.2. MATERIAIS

3.2.1. Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi estudado em alguns trabalhos (DOURADO, 2013; MIRANDA, 2013), e apresenta baixa qualidade como material de pavimentação. Miranda (2013) constatou pelo ensaio de MCT, que o solo apresenta comportamento não-laterítico silto-arenoso (NS'), que compreende solos com baixa capacidade de suporte quando imersos em água, baixo módulo de resiliência, elevada erodibilidade e expansibilidade, elevado coeficiente de sorção e média permeabilidade. Além disso, esse solo em condições naturais apresenta geralmente baixa massa específica aparente seca, podendo ser colapsível e ter baixa capacidade de suporte.

A escolha deste solo foi motivada, pelo fato de que este material, presente numa jazida em exploração, mas que por si só não pode ser utilizado em camadas de base e sub-base de pavimentos, sendo necessária a sua estabilização. Pode estar presente em subleitos na região da jazida. Buscou-se nesta pesquisa, alternativas de melhoria do material através da utilização de resíduo e estabilizante, para fazer o uso deste material em camadas de pavimentos.

Dourado (2013) estudou o uso de cinza de queima de lixo para estabilização deste solo com sucesso na diminuição da expansibilidade e certa melhora do MR. Também testou a adição de pequeno percentual de cal com melhora substancial das condições mecânicas.

O solo saprolítico foi coletado na Jazida do Manelão, localizada no município de Belford Roxo (Figura 3.2) e levado ao Laboratório de Geotecnia e



Figura 3.4: Aparência do solo no momento da coleta na Jazida Manelão

3.2.2. Material granular (pó de pedra)

Foi utilizada também nesta pesquisa uma amostra de pó de pedra, pelo motivo deste material ser bastante comum em todo território nacional, de certa forma tornando-se representativo de outras regiões. Além disso, o material foi escolhido também por ser muito empregado em camadas de sub-base na cidade do Rio de Janeiro-RJ. Ramos (2003) relata este emprego e mostra a caracterização de várias pedreiras da região metropolitana do Rio de Janeiro.

O pó de pedra é proveniente da Pedreira Sepetiba e é classificado como um gnaisse de composição quartzo-monzolítica (RAMOS, 2003). A pedreira está localizada na Rua Félix Lopes Coelho nº 222 - Ilha da Madeira em Itaguaí-RJ. Na Figura 3.5 é apresentada a localização da jazida e na Figura 3.6 a aparência do material como utilizado. É um agregado miúdo britado, com grande quantidade de finos como será mostrado na sua caracterização.



Figura 3.5: Localização da Pedreira Sepetiba onde foi coletado o pó de pedra deste estudo



Figura 3.6: Amostra de pó de pedra utilizado neste estudo

3.2.3. Lodo de ETE

O lodo utilizado nesta pesquisa é proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos Alegria, situada no bairro do Caju, na cidade do Rio de Janeiro, conforme mostrado na Figura 3.7. Na Figura 3.8 mostra-se uma visão aérea da estação e na Figura 3.9 detalham-se locais específicos da ETE.

A Estação Alegria é a obra mais importante do Programa de Despoluição da Baía de Guanabara realizada até o momento. É uma unidade de grande porte,



Figura3.8: Imagem panorâmica da ETE Alegria (CÁPUA ENGENHARIA, 2013)

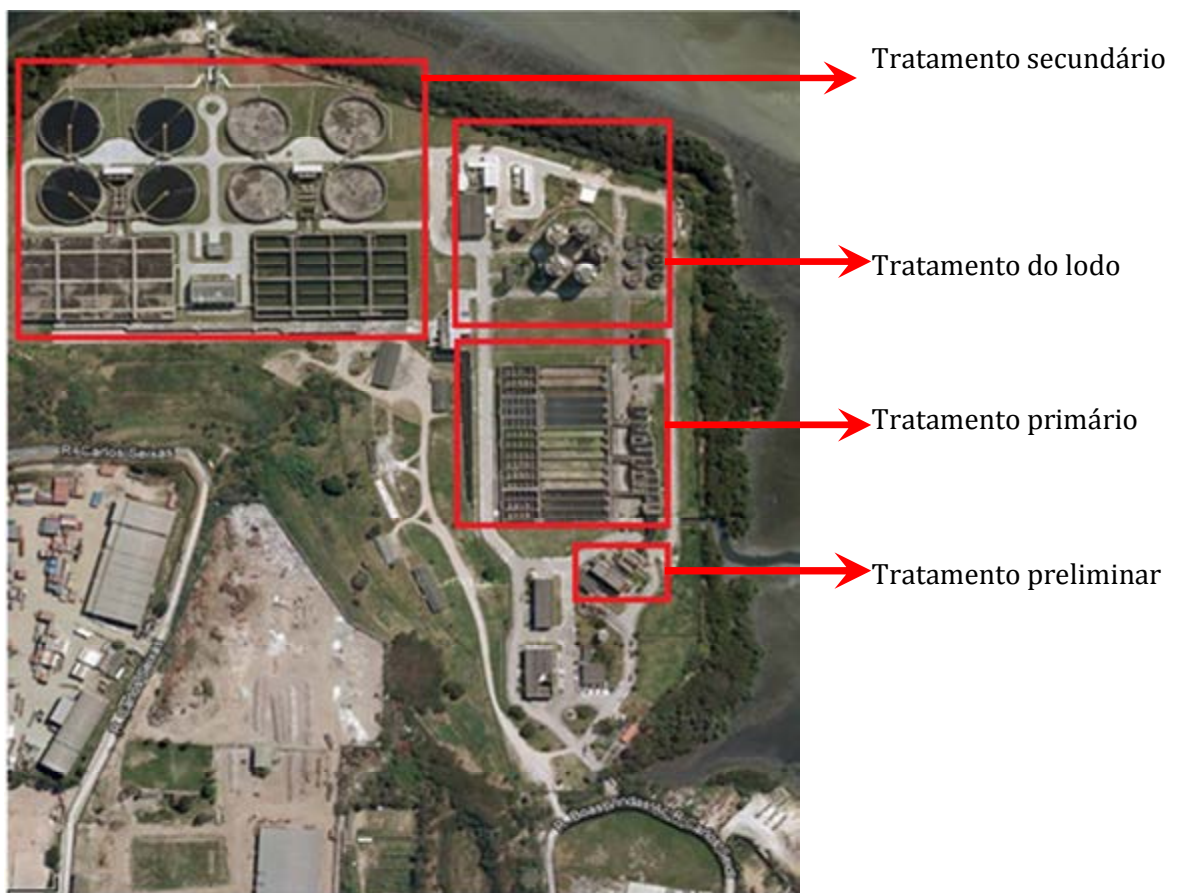


Figura 3.9: Etapas de tratamento de esgoto da ETE Alegria

O sistema de tratamento implantado nesta estação é composto de tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário e tratamento da fase sólida, conforme mostrado nas Figuras 3.8 e 3.9.

A seguir serão descritas sucintamente as fases de tratamento do esgoto na ETE Alegria, com referência ao trabalho de Daniel Marques Braz (Braz, 2012), e também informações cedidas pelo Palestrante João Vasconcelos Torres, durante uma visita a estação.

O esgoto chega a Estação Alegria abaixo no nível do terreno, e passa pelo tratamento preliminar para a retirada de sólidos por meio de sistema de gradeamento grosso, onde são retirados pedaços de madeira, garrafas PET etc. Esse esgoto depois de gradeado é bombeado por uma elevatória acima do nível do terreno, onde há um gradeamento mais fino. Os materiais retirados do gradeamento são encaminhados para o aterro sanitário. Como a areia sedimenta rapidamente, a etapa seguinte consiste em separá-la nos desarenadores. A areia é retirada do fundo por um raspador e depositada em caçambas. Uma parte dessa areia a CEDAE doa para a comunidade, onde é utilizada nas construções. E a parte que sobra é transportada para o aterro sanitário, em Gramacho.

A segunda etapa é denominada de tratamento primário. Depois da retirada de areia dos desarenadores, o esgoto segue para os decantadores primários, onde alguns materiais vão sedimentar, formando um lodo no fundo dos recipientes, e outros, como o óleo e espuma irão flutuar. Lâminas raspadeiras empurram as gorduras e os óleos para uma extremidade e o lodo sedimentado para outra extremidade. O material separado é retirado por bombas. A partir desse momento, o processo segue dois caminhos, a fase líquida e a fase sólida.

Na fase líquida começa o tratamento secundário, que tem como objetivo remover a matéria orgânica através de processos biológicos, do tipo lodo ativado. O líquido resultante do tratamento primário vai para grandes tanques de aeração onde é fornecido ar para os microrganismos nele contidos, fazendo com que esses se multipliquem e se alimentem da matéria orgânica, o que formará o lodo e diminuirá a carga poluidora do esgoto.

Depois, o material segue para tanques de decantação onde o lodo formado se deposita no fundo do decantador, deixando a parte líquida livre de 90% das impurezas. Essa água é então despejada na Baía de Guanabara.

O tratamento da fase sólida na ETE Alegria é realizado pelos digestores, adensadores e centrifugas. O lodo primário, ainda muito aquoso segue para os adensadores, que o tornam mais consistente. O lodo primário, secundário e a espuma são bombeados para os digestores biológicos, onde bactérias anaeróbias e facultativas estabilizam a matéria orgânica produzindo um lodo inerte digerido, água e gás metano.

O lodo é bastante aquoso ainda, tendo mais de 95% de umidade, sendo necessário passar por um procedimento de secagem para ser encaminhado para o aterro sanitário, que só aceita material com até 70% de umidade. O lodo precisa ser transformado em matéria pastosa, e por isso passa por um processo de centrifugação que o deixa com umidade próxima a 70%.

Na ETE Alegria, esse lodo será reduzido ainda mais, nos secadores, que são alimentados pelo gás metano, originário da etapa anterior. Assim que a estação estiver funcionando com sua capacidade total, produzindo a quantidade de metano suficiente, o lodo poderá ser reduzido em 1/3 do seu volume, deixando o processo de transporte desse material mais barato.

Na época da primeira coleta do lodo na ETE Alegria, em maio de 2013, saíam um ou dois caminhões por dia, carregando entre 6t e 8t de lodo para os aterros sanitários da cidade segundo informações do palestrante João Vasconcelos Torres.

Segundo Braz (2012), a ETE Alegria possui vários projetos ambientais ligados ao tratamento de esgoto. Os principais desenvolvidos são: produção de biodiesel, produção de energia elétrica e reflorestamento da mata ciliar.

Os dois primeiros foram desenvolvidos pela UFRJ, que são chamados de planta piloto, onde através da espuma do esgoto é gerado o biodiesel e o outro é o de produção de energia elétrica, através dos gases gerados nos digestores.

O terceiro e último, consiste no aproveitamento do lodo produzido no tratamento de esgotos como nutriente para produção de mudas. O programa de reflorestamento da CEDAE, utiliza mão de obra de apenados de regime aberto e semi-aberto, por meio de convênio com a Fundação Santa Cabrini, da Secretaria de Administração Penitenciária.

3.2.3.1. Coleta do lodo de ETE

Foram realizadas três coletas de lodo durante a pesquisa. A primeira coleta foi realizada no dia 02 de maio de 2013, através de caminhão coberto com lona na qual foram coletados cerca de 300kg de lodo. Este lodo foi armazenado em bombonas plásticas, sacos plásticos e em bandejas. Para manuseio do resíduo foram tomados os devidos cuidados, como por exemplo, o uso de luvas e máscaras.

A Figura 3.10 mostra esta primeira coleta do lodo de esgoto na ETE Alegria, o descarregamento do material no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da COPPE e o armazenamento do resíduo.



Figura. 3.10: Coleta do lodo de esgoto na ETE Alegria e armazenamento no Laboratório da COPPE em maio de 2013

Esta primeira coleta de lodo foi utilizada para fazer as misturas do experimento piloto e também alguns testes com estabilizantes.

A segunda coleta do material foi realizada no dia 15 de outubro, porém a quantidade de lodo coletado foi menor que a anterior, cerca de 80kg somente. Esta segunda coleta foi necessária para a realização dos ensaios ambientais de lixiviação e solubilização, ensaios microbiológicos e também para a composição das misturas definitivas, com lodo in natura, lodo seco a 60°C e lodo calcinado.

Ainda, uma terceira coleta foi realizada, para serem executados novos ensaios microbiológicos. A coleta do resíduo foi efetuada no dia 10 de dezembro de 2013 e a quantidade de material coletada foi cerca de 8kg.

3.2.3.2. Procedimento de secagem do lodo de esgoto

No dia da primeira coleta, houve um problema com a centrífuga da ETE e o lodo foi disponibilizado com umidade superior ao padrão, chegando ao Laboratório com cerca de 74% de teor de umidade. Tentou-se preservar a amostra em saco plástico fechado, porém observou-se que devido ao alto teor de matéria orgânica, a amostra começou a mofar. A partir disto, verificou-se primeiramente que a melhor solução seria secar este lodo e usar o resíduo seco para fazer as misturas.

A amostra foi então colocada em bandejas e seca em estufa com temperatura de 60°C durante cinco dias. Observou-se a formação de grandes torrões no lodo, os quais foram “quebrados” com o uso de soquete de compactação, conforme mostrado na Figura 3.11.



Figura 3.11: Quebra de torrões de lodo de esgoto após secagem por 5 dias a 60°C

Como o estudo realizado em corpos de prova com tamanho de 10cm de diâmetro e 20cm de altura, demanda quantidade muito pequena de lodo nas proporções previstas, optou-se após a quebra do lodo, por passá-lo na peneira $\frac{1}{2}$ "(12,7mm) de modo a evitar grande concentração de resíduo em regiões específicas no corpo de prova.

Surgiu a ideia então de se peneirar previamente o lodo úmido na peneira de $\frac{1}{2}$ "(12,7mm), antes de colocá-lo em estufa, visando facilitar o trabalho posterior e também gerar granulometria mais homogênea do material seco. A Figura 3.12 mostra o procedimento adotado.

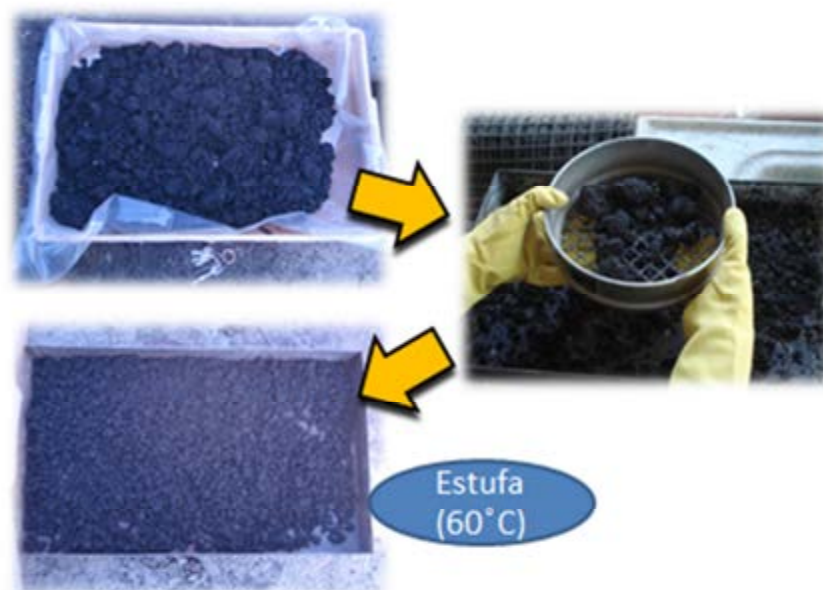


Figura 3.12: Procedimento para secagem da amostra de lodo de ETE neste trabalho

3.2.3.3. Produção da cinza de lodo de ETE

Na calcinação os sólidos voláteis do lodo são queimados na presença de oxigênio, sendo a parcela dos sólidos fixos transformados em cinza, sendo eliminados no processo os microrganismos patogênicos e os compostos orgânicos tóxicos. Os metais, entretanto, não são eliminados pela incineração e se concentram nas cinzas.

Para a produção da cinza de lodo de esgoto, primeiramente o resíduo foi seco em estufa na temperatura de 100°C. Após, este foi destorroado manualmente e calcinado em mufla, também chamada de forno de ignição, utilizando temperatura de 550°C. Este forno tem balança interna que permite acompanhar a perda de massa da amostra colocada em seu interior e optar por interromper a queima em qualquer tempo ou quando atingir a constância de massa. Normalmente é utilizado para determinar o teor de ligante asfáltico de uma mistura asfáltica por queima do cimento asfáltico de petróleo (CAP).

A mufla utilizada registra o tempo e a perda de material para cada temperatura, com isso foi possível traçar um gráfico da perda de massa da amostra em função da temperatura, conforme mostrado na Figura 3.13. A perda de massa registrada para a temperatura de 550°C foi de cerca de 53%, ou seja, 1000g de lodo gerou 470g de cinza. Nesta massa perdida, parte era água parte componentes orgânicos e outros.

Não foi definido um tempo de residência da amostra na mufla. A amostra só foi retirada da mufla após a estabilização da massa do material. Quando isso acontece, a mufla apita e o ensaio é automaticamente encerrado. Isso foi definido, pensando que nem sempre a amostra ao ser colocada na mufla estaria totalmente seca, embora antes tendo sido colocada em estufa a 100°C para agilizar o processo, mas podendo variar a umidade e conseqüentemente perder mais ou menos massa num tempo inicial.

A escolha da temperatura a 550°C foi baseada em alguns trabalhos como: GEYER (2001), FONTES (2003) e PEREIRA (2012).

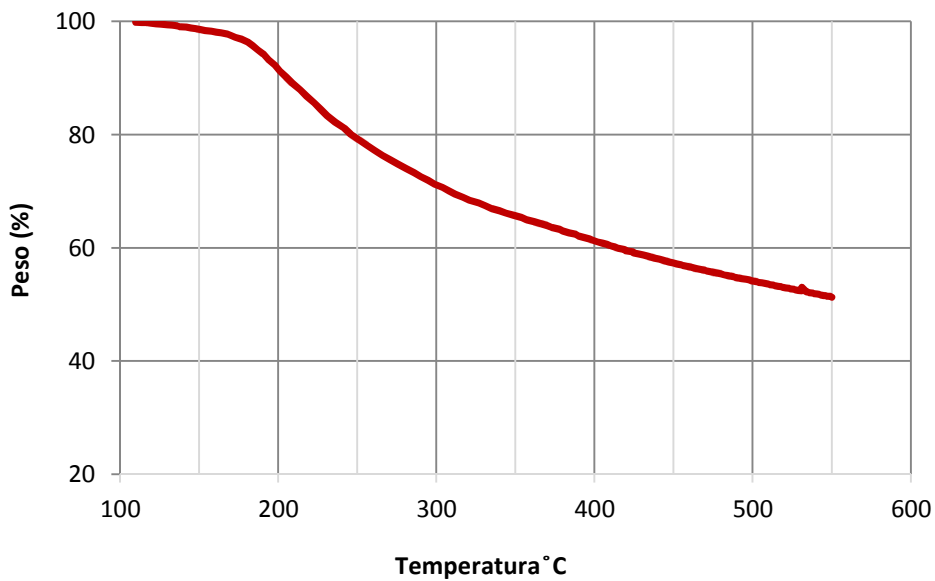


Figura 3.13: Perda de massa da amostra de lodo de esgoto em função da temperatura da mufla usada neste experimento

Nas Figuras 3.14 e 3.15 a seguir são apresentadas a mufla utilizada, existente no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da COPPE/UFRJ e a amostra queimada a 550°C já destorroada com almofariz e mão de gral.



Figura 3.14: Mufla utilizada para a calcinação do lodo de ETE deste estudo



Figura 3.15: Cinza de lodo de ETE obtida a temperatura de 550°C e destorroada com almofariz e mão de gral, usada no presente estudo

3.2.4. Cal

A cal utilizada nas misturas deste estudo é cal hidratada calcítica, conhecida comercialmente por “Minas Cal”.

Segundo Guimarães (2002), a cal hidratada é resultante da hidratação dos óxidos de cálcio e/ou cálcio magnésio e é obtida na forma de pó seco, com 17% a 19% de água combinada. A cal é classificada, de acordo com a norma NBR 7175 (2003) da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em função de sua composição química, como CH I, CH II e CH III, sendo que a diferença principal entre esses tipos de cales encontra-se nos teores de cálcio e nos teores de magnésio.

A cal foi adquirida em Julho de 2013 em saco de 20kg, após aberto foi devidamente lacrado de forma a evitar que as suas propriedades fossem alteradas. Na Tabela 3.1 estão apresentadas as exigências da NBR 7175 – Cal Hidratada para Argamassas, para a cal estudada que se classifica como CH-III.

Tabela 3.1: Propriedades da cal utilizada na pesquisa segundo a NBR 7175/2003

Exigências Químicas		
Compostos		Limites
		CH-III
Anidrido Carbônico (CO ₂)	Fábrica	≤ 13%
	Depósito	≤ 15%
Óxido de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO + MgO)		≤ 15%
Óxidos totais na base de não voláteis		≥ 88%
Exigências Físicas		
Compostos		Limites
		CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600mm	≤ 0,5%
	Peneira 0,074mm	≤ 15%
Retenção de água		≥ 70%
Incorporação de areia		≥ 2,2
Estabilidade		Ausência de cavidade ou protuberância
Plasticidade		≥ 110%

3.2.5. Cimento

O cimento utilizado foi do tipo CPIIF-32, adquirido em saco de 50kg e que após aberto foi lacrado para evitar o contato com a umidade. A principal função do cimento na mistura é de melhorar as características de resistência. A Tabela 3.2 apresenta os critérios exigidos pela NBR para o tipo de cimento utilizado nesta pesquisa. A escolha deste cimento foi determinada pela sua fácil disponibilidade no comércio.

Tabela 3.2: Critérios do cimento CPIIF-32

Ensaio Físicos	Critério	Norma
Blaine	≥ 2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	≥ 1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	≤ 10	NBR NM 65
Finura na # 200 (%)	≤ 12	NBR 11579
Finura na #325 (%)	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	≤ 5	NBR 11582
Consistência normal (%)	-	NBR NM 43
Resistência a compressão 1 dia (MPa)	-	NBR 7215
Resistência a compressão 3 dias (MPa)	≥ 10	NBR 7215
Resistência a compressão 7 dias (MPa)	≥ 20	NBR 7215
Resistência a compressão a 28 dias (MPa)	≥ 32	NBR 7215

3.3. MISTURAS ESTUDADAS

Foram estudadas no total quinze (15) misturas, visando determinar o teor de lodo que possibilitasse bons parâmetros mecânicos e ambientais para utilização em camadas de base ou sub-base de pavimentos.

A seguir serão apresentados os teores estudados em cada mistura, conforme as seguintes etapas: experimento piloto e experimento com estabilizantes.

3.3.1. Experimento piloto

Com o intuito de verificar a influência do resíduo sobre o comportamento mecânico do solo e do pó de pedra, foram feitas adições do lodo seco a 60°C nas proporções de 5%, 10% e 15%, conforme mostrado na Tabela 3.3. A codificação das misturas segue o seguinte critério: S (solo) seguida da proporção e L (lodo) seguido da sua proporção, o mesmo para o pó de pedra (P).

Tabela 3.3: Misturas estudadas no experimento piloto desta dissertação

Mistura	Solo (%)	Pó de Pedra (%)	Lodo seco a 60°C(%)
S95L5	95	-	5
S90L5	90	-	10
S85L15	85	-	15
P95L5	-	95	5
P90L10	-	90	10
P85L15	-	85	15

As misturas foram dosadas em peso seco do material. As misturas com solo foram misturadas a seco, depois foi adicionada a quantidade de água necessária para conseguir o teor de umidade desejado para a compactação, e novamente misturado. Logo depois cada porção correspondente ao necessário para compactar um corpo de prova era armazenada em sacos plásticos para preservar a umidade e todas guardadas por um dia na câmara úmida do laboratório, para promover a homogeneização da umidade em todo o material. Já as misturas com pó de pedra, foram misturadas umedecidas, e já compactadas no mesmo momento.

As Figuras 3.16, 3.17 e 3.18 mostram as proporções de materiais utilizados, onde nota-se que apesar do lodo ter percentagens pequenas de 5%, 10% e 15% apresenta um volume grande em comparação aos outros materiais, o solo e o pó de pedra, visto que as densidades são diferentes. Estas proporções referem-se cada uma a quantidade de material correspondente a um corpo de prova de 10cm de diâmetro e 20cm de altura.

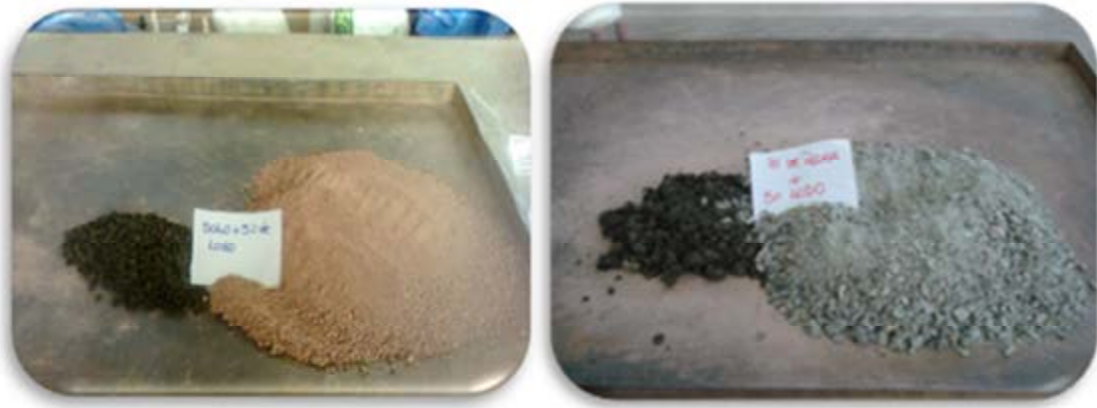


Figura 3.16: Misturas S95L5 e P95L5 para um corpo de prova

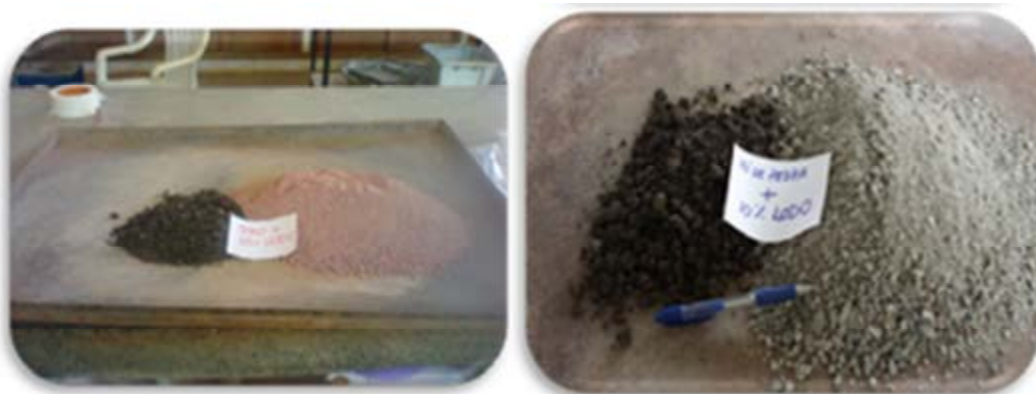


Figura 3.17: Misturas S90L10 e P90L10 para um corpo de prova



Figura 3.18: Misturas S85L15 e P85L5 para um corpo de prova

3.3.2. Experimento com estabilizantes

O experimento consistiu em buscar algumas alternativas das misturas com lodo de ETE através do uso de estabilizantes. Nesta fase da pesquisa, foi utilizado: lodo in natura, lodo seco a 60°C e lodo calcinado a 550°C.

Os materiais (solo – lodo – estabilizante ou pó – lodo –estabilizante) foram misturados a seco, e logo após foi adicionada a quantidade de água necessária para conseguir o teor de umidade desejado para a compactação. As misturas foram compactadas imediatamente para que não houvesse tempo de reação do estabilizante com a água. A Figura 3.19 mostra os procedimentos da mistura solo-lodo-cal como exemplo e a Tabela 3.4 mostra a proporção dos materiais das misturas estudadas.



Figura 3.19: Procedimento para mistura de solo-resíduo-estabilizante

Tabela 3.4: Misturas estudadas no experimento com estabilizantes

Mistura	Solo (%)	Pó de Pedra (%)	Lodo seco a 60°C (%)	Lodo in natura (%)	Lodo calcinado (%)	Cal (%)	Cimento (%)
S82L15C3	82	-	15	-	-	3	-
S80L15C5	80	-	15	-	-	5	-
S90L5C5	90	-	5	-	-	5	-
P83L15Ci2	-	83	15	-	-	-	2
P91L5Ci4	-	91	5	-	-	-	4
P91LN5Ci4	-	91	-	5	-	-	4
P81LN15Ci4	-	81	-	15	-	-	4
S80CL15C5	80	-	-	-	15	5	-
S95C5	95	-	-	-	-	5	-

Para a mistura com pó de pedra, cimento e 15% de lodo in natura, não foi necessário acrescentar água, já que o lodo encontrava-se muito úmido. Já na mistura com 5% de lodo in natura, foi necessário acrescentar um pouco de água, já que a quantidade de resíduo foi bem menor. Na Figura 3.20 estão apresentadas algumas das misturas realizadas neste experimento para ilustrar as proporções volumétricas dos componentes.

Para as misturas com lodo in natura, duas misturas testes foram realizadas no mesmo dia da coleta do lodo de esgoto, e também algumas amostras do resíduo foram conservadas em geladeira com temperatura de 4 ± 2 °C, onde permaneceram num período de uma semana para a realização das misturas definitivas.



Figura 3.20: Algumas misturas realizadas no experimento com estabilizantes

A dosagem de cal a ser adicionada nas misturas foi determinada a partir do método do pH. O ensaio será detalhado no procedimento experimental do subitem 3.4.2.7 a seguir.

Para comparação, foi realizada também uma mistura de solo-cal, de forma a avaliar o comportamento mecânico das misturas sem resíduo e com resíduo.

3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste item serão abordados os ensaios realizados em laboratório, como a caracterização física e química dos materiais, caracterização mecânica dos materiais e misturas, e a análise ambiental do resíduo.

Nos fluxogramas das Figuras 3.21, 3.22 e 3.23 são apresentados os ensaios realizados para cada fase da pesquisa.

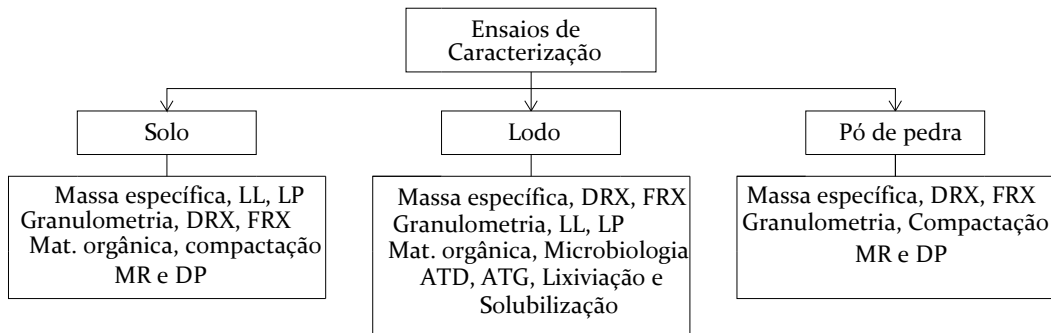


Figura 3.21: Fluxograma dos ensaios de caracterização dos materiais deste estudo

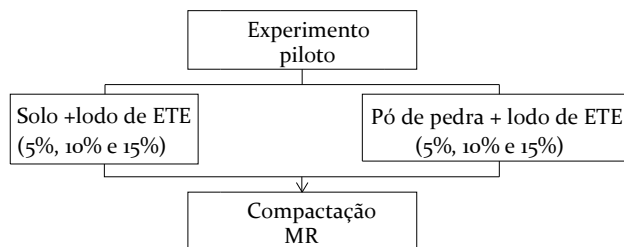


Figura 3.22: Fluxograma dos ensaios realizados no experimento piloto deste estudo

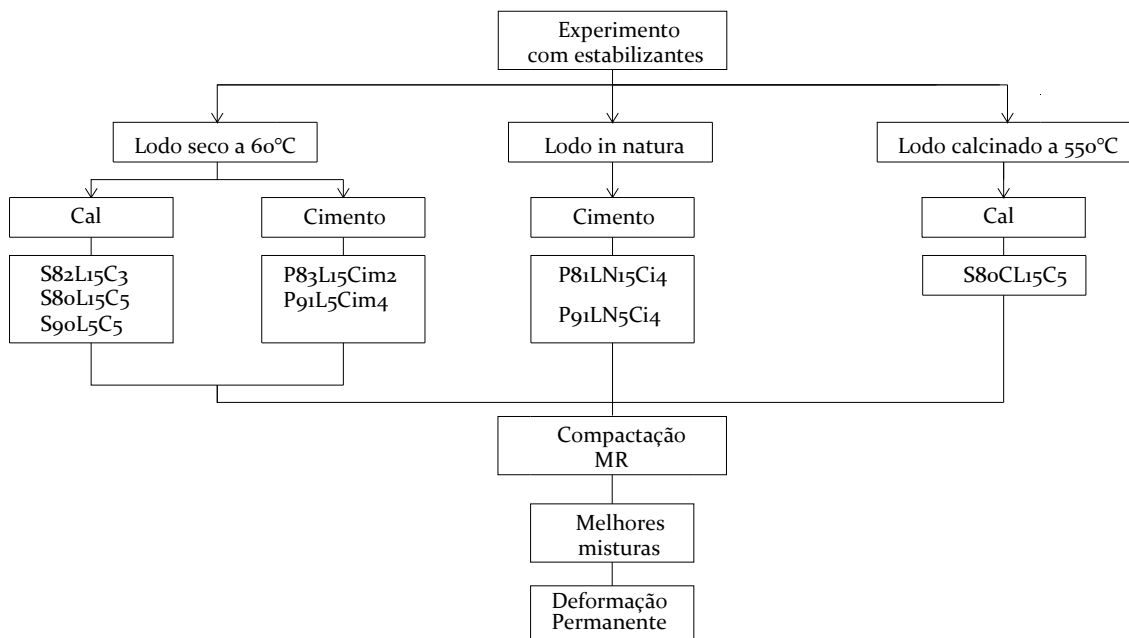


Figura 3.23: Fluxograma dos ensaios realizados no experimento com estabilizantes neste estudo

3.4.1. Ensaios de caracterização física

Os ensaios de caracterização física do solo, pó de pedra e lodo de ETE, envolveram ensaios de análise granulométrica, massa específica real dos grãos e limites de Atterberg.

3.4.1.1. Massa específica real dos grãos

Os ensaios para a determinação da massa específica real dos grãos dos materiais foram realizados no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ seguindo a NBR 6508/1984 – Massa específica Real dos grãos. Para o pó de pedra não foi realizado ensaio, e foi adotada a massa específica real dos grãos obtida por Budny (2012), para a mesma amostra estudada nesta pesquisa.

3.4.1.2. Análise Granulométrica

A análise granulométrica do solo, lodo de esgoto e cinza de lodo de esgoto foram realizadas segundo a NBR 7181/1984. Como os materiais são constituídos tanto por fração grossa como por fração fina, realizou-se ensaio por meio da granulometria conjunta, englobando as etapas de peneiramento e sedimentação com defloculante hexametáfosfato de sódio.

A granulometria do pó de pedra Sepetiba foi obtida do trabalho de Budny (2012).

3.4.1.3. Limites de Atterberg

Visando caracterizar a interação dos materiais com a água, os ensaios de limite de liquidez e de plasticidade foram realizados segundo a NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez (LL) e a NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade (LP).

Através dos resultados obtidos por esses ensaios é possível determinar o Índice de Plasticidade (IP), conforme a equação 3.1.

$$IP = LL - LP \quad (3.1)$$

3.4.2. Ensaios de caracterização química e ambiental

Foram realizados ensaios de caracterização química e ambiental, para verificar a viabilidade da utilização de lodo de ETE sem prejudicar o meio ambiente ou a saúde humana. Os ensaios realizados consistem em ensaios de composição química, mineralogia, microbiologia, análise termogravimétrica e termodiferencial, teor de matéria orgânica e caracterização do resíduo segundo a NBR 10.004/2004.

3.4.2.1. Características microbiológicas

Foram realizados ensaios de caracterização microbiológica para detectar a presença de agentes patogênicos no lodo in natura. A análise de coliformes termotolerantes das duas amostras coletadas foi realizada no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA) da Escola de Engenharia da UFRJ, seguindo o Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto – Cléverson Vitório Andreolli e Bárbara Rocha Pinto Bonnet (SANNEPAR/PROSAB).

Foi realizada uma terceira coleta, para avaliar a presença de agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos: coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos e salmonela, segundo a Resolução nº 375 do CONAMA. A análise foi realizada pela Empresa INNOLAB do Brasil Ltda.

Não foi possível determinar vírus entéricos, pois não foi encontrada empresa que determinasse este tipo de parâmetro próximo ao Rio de Janeiro.

3.4.2.2. Teor de matéria orgânica

Os ensaios de teor de matéria orgânica do lodo e do solo foram realizados no Laboratório de Geotecnia/Química da COPPE.

Para o solo a matéria orgânica foi determinada por oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico, usando o sulfato de prata como

catalizador, sendo o excesso de dicromato após a oxidação, dosado por titulação com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal, utilizando difenilamina como indicador. O teor de carbono assim obtido foi multiplicado por 1,724 obtendo-se o teor de matéria orgânica.

Foi realizada também a determinação da matéria orgânica do lodo de ETE, segundo a NBR 13.600/1996 – Determinação da matéria orgânica por queima a 440°C. Para o presente estudo, foi utilizada uma temperatura de 400°C.

O ensaio consistiu em obter uma amostra de no mínimo 50g de material e depositá-la em um cadinho de porcelana de massa conhecida, cuidando para que a espessura do material no cadinho não exceda 3cm. Em seguida o conjunto cadinho+material foi colocado em estufa, com temperatura entre 105°C e 110°C, para a retirada de umidade durante 24 horas ou até apresentar constância de massa. Após este período, a massa foi verificada e o material foi submetido à temperatura de 400°C, por um período de 12 horas, numa mufla, para a queima da matéria orgânica. Posteriormente a massa do conjunto é verificada e então a partir da Equação 3.2 foi possível determinar o teor de matéria orgânica no material.

$$MO = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

MO – matéria orgânica (%)

A – massa da amostra seca em estufa, a temperatura de 105°C a 110°C

B – massa da amostra queimada em mufla, a temperatura de 400°C.

3.4.2.3. Análise Termodiferencial (ATD) e Análise Termogravimétrica (ATG)

As análises termodiferencial e termogravimétrica são procedimentos que baseiam suas inferências nas modificações experimentadas pelo material em decorrência do seu aquecimento a temperaturas elevadas. A curva termodiferencial permite identificar compostos que sofrem reações químicas ou

estruturais em resposta ao incremento de temperatura, enquanto a curva termogravimétrica possibilita a quantificação das perdas de massa envolvidas nestes processos.

As análises termogravimétricas e termodiferencial (ATG/ATD) foram realizadas no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, em um equipamento simultâneo DSC-TGA, modelo SDT Q-600, da TA *Instruments*, nas seguintes condições de operação: taxa de aquecimento de 10°C/min até 1000°C, porta amostra de alumina, 8mg de amostra, análise em atmosfera inerte (N₂) com fluxo máximo de 100ml/min.

3.4.2.4. Composição química

Os ensaios de composição química das amostras de lodo de ETE, solo, pó de pedra e cinza de lodo de ETE foram realizados no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Para a determinação dos elementos químicos as amostras foram preparadas em prensa automática X-PRESS, e analisadas semiquantitativamente em espectrômetro por fluorescência de raio X (WDS), modelo AXIOS (Panalytical).

3.4.2.5. Análise mineralógica

O ensaio de difração de raio X tem como objetivo identificar a composição mineralógica dos materiais. A análise por difração de raios-X foi realizada no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Os difratogramas de Raios-X (DRX) das amostras foram obtidos pelo método do pó, e coletados em um equipamento Bruker-D4 Endeavor, nas seguintes condições de operação: radiação Co Ka (35 kV/40 mA); velocidade do goniômetro de 0,02° 2 θ por passo com tempo de contagem de 1 segundo por passo e coletados de 5 a 80° 2 θ . As interpretações qualitativas de espectro foram efetuadas por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF02 (ICDD, 2006) em software BrukerDiffrac^{Plus}.

3.4.2.6. Ensaios de lixiviação e solubilização

O lodo de esgoto foi classificado segundo a norma NBR 10.004/2004 – Resíduos sólidos, com a finalidade de classificar o resíduo quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública.

Os ensaios da amostra de lodo de esgoto in natura e cinza de lodo de esgoto foram realizados pelo Laboratório Innolab. As amostras foram preparadas segundo a norma NBR 10.007/2004 – Amostragem de resíduos sólidos. O ensaio de lixiviação foi realizado seguindo a NBR 10.005/2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, e o ensaio de solubilização foi realizado seguindo a norma NBR 10.006/2004 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.

3.4.2.7. Método do pH

Foi realizada uma dosagem das misturas com cal utilizando o Método de Eades e Grim (1966), conhecido também como o método do pH. Para o procedimento, foi utilizada a mistura com maior teor de lodo (15%) e teores de cal de 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12%. Segundo os autores, o menor teor de cal que proporcionar um valor de pH de 12,4 é o suficiente para estabilizar o solo. O procedimento adotado, conforme TRB (1987) e procedimentos da COPPE consistem nas seguintes etapas:

1. Em recipientes plásticos, adiciona-se 10g da mistura passante na peneira nº 40;
2. Acrescentam-se em cada recipiente teores de cal diferentes;
3. Cada recipiente é preenchido com 50ml de água destilada e agitado durante um minuto;
4. O frasco é deixado em repouso durante 24 horas, agita-se novamente a mistura e em seguida são feitas as medidas de pH.

A Figura 3.24 ilustra os passos do procedimento do método do pH sendo aplicado nesta pesquisa.

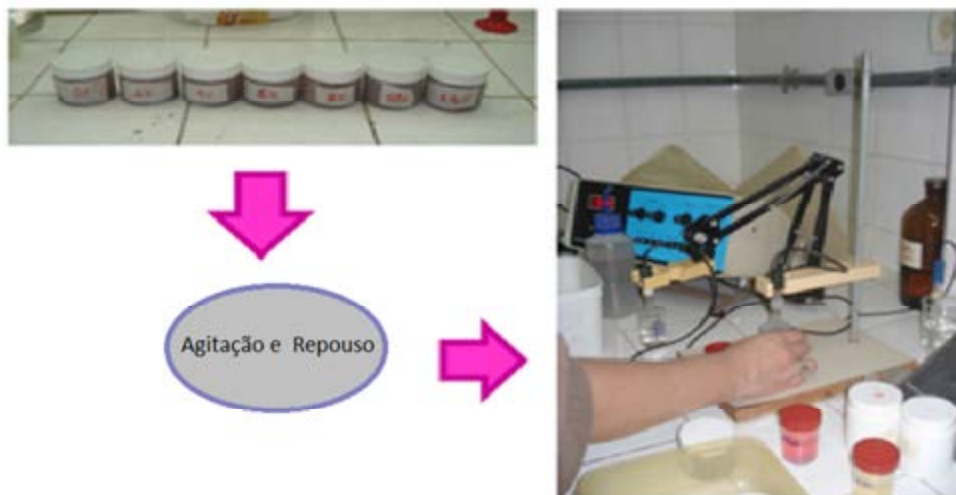


Figura 3.24: Procedimentos do método de Eades e Grim (1966) realizados nesta pesquisa

3.4.3. Ensaios de caracterização mecânica

Os ensaios para caracterização mecânica dos materiais e misturas foram os seguintes: ensaios de compactação, módulo de resiliência e deformação permanente sob cargas repetidas.

3.4.3.1. Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados segundo a NBR 7182/1986 (ABNT, 1986), utilizando energia de compactação intermediária, com modificação somente quanto ao cilindro utilizado.

As curvas de compactação foram determinadas no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, onde foram compactados corpos de prova com 10cm de diâmetro e 20cm de altura, em moldes tripartidos com auxílio do compactador mecânico. A justificativa para o emprego deste tamanho de corpo de prova é de que este também será utilizado nos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e deformação permanente.

3.4.3.2. Ensaio de Módulo de Resiliência

Os ensaios triaxiais de cargas repetidas foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da COPPE de acordo com a norma DNIT-ME 134/2010 – Solos - Determinação do Módulo de Resiliência.

O módulo de resiliência dos solos é por definição a relação entre tensão vertical desvio e a deformação específica correspondente, e é obtido por vários pares de tensões, confinante e desviadora, para representar melhor o comportamento dos materiais de pavimentação.

No ensaio triaxial de cargas repetidas, a tensão vertical ou tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) é aplicada no topo da amostra, sempre no sentido de compressão, de forma cíclica, promovendo carregamento e descarregamento repetidos, dependendo da frequência e magnitude que se deseja, enquanto a tensão confinante σ_3 permanece constante.

O ensaio é executado em duas etapas: a primeira etapa consiste no condicionamento do material ensaiado, com a finalidade de minimizar os efeitos de deformação plástica e da história de tensões, e a segunda, consiste na realização do ensaio propriamente dito, visando a obtenção do Módulo de Resiliência (MR), aplicando-se pares de tensão confinante e desviadora pré-definidos e medindo-se a deformação específica resiliente correspondentes.

Para as misturas do experimento piloto e do experimento com estabilizantes foram aproveitados os corpos de prova da curva de compactação. Para as misturas definitivas, foram moldados 3 corpos de prova nas condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. Todos os corpos de prova foram compactados em molde tripartido com 10cm de diâmetro e 20cm de altura utilizando energia intermediária.

O procedimento detalhado do ensaio triaxial pode ser sistematizado nos seguintes passos, segundo Medina e Motta (2005):

1. Após a compactação, mede-se a massa do corpo de prova ainda dentro do molde, descontando-se a massa do molde tripartido;

2. Coloca-se o corpo de prova (CP) sobre a pedra porosa, ainda envolvido pelo molde cilíndrico tripartido;
3. Retiram-se as braçadeiras, desmoldam-se as três partes do cilindro;
4. Coloca-se o cabeçote sobre o CP;
5. Com o auxílio do encamisador, envolve-se o CP com a membrana de borracha;
6. Colocam-se elásticos envolvendo a membrana na altura do cabeçote;
7. Coloca-se o CP sobre a base da célula triaxial;
8. Colocam-se elásticos envolvendo a membrana na altura da base da célula triaxial;
9. Fixam os LVDTs ao cabeçote;
10. Coloca-se o cilindro da célula triaxial;
11. Colocam-se as hastes de fixação da tampa da célula triaxial;
12. Assenta-se a tampa da célula triaxial, prendendo-a às respectivas hastes;
13. Coloca-se a conexão da haste ao pistão de carga;
14. Encaixam-se os mangotes de ar comprimido para aplicação das tensões desvio e confinante.
15. Libera-se o ar comprimido;
16. Liga-se o sistema de aquisição de dados;
17. Faz-se o ajuste fino dos LVDTs, com auxílio das hastes rosqueadas, dentro do intervalo de voltagem para a leitura dos deslocamentos;
18. Inicia-se a fase de condicionamento, para eliminar ou minimizar os efeitos de deformação plástica e da história de tensões, com aplicação de 500 pulsos de carga em três estágios de aplicação desvio e confinante. O equipamento triaxial da COPPE já está programado para realização desta fase;
19. Após condicionamento, ajustam-se novamente os transdutores e inicia-se o ensaio triaxial. Também nesta etapa as condições para o ensaio já estão programadas.

Ao término do ensaio é gerado um relatório contendo as seguintes informações: pares de tensões, deformações resilientes e módulo de resiliência. Os

pares de tensões aplicados durante as duas etapas, de condicionamento e de obtenção do módulo de resiliência estão apresentados no Quadro 3.1.

Quanto aos corpos de prova do experimento piloto e dos materiais pó de pedra e solo, estes foram compactados e imediatamente foi realizado o ensaio de MR. Para as misturas com estabilizantes, os ensaios foram realizados com tempo de cura de 7, 28 e 90 dias para misturas com cal e 7, 14 e 28 dias para misturas com cimento.

Durante o tempo de cura, e logo após a realização de cada ensaio, o corpo de prova foi armazenado em câmara úmida. Os corpos de prova foram envolvidos pela membrana de borracha, uma proteção de PVC e vedados em sacos plásticos ao serem dispostos na câmara úmida, após serem devidamente identificados com o número de protocolo da COPPE/UFRJ.

Na Figura 3.25 é apresentado um esquema ilustrativo do ensaio triaxial de cargas repetidas e na Figura 3.26 é mostrado o equipamento da COPPE utilizado nesta pesquisa.

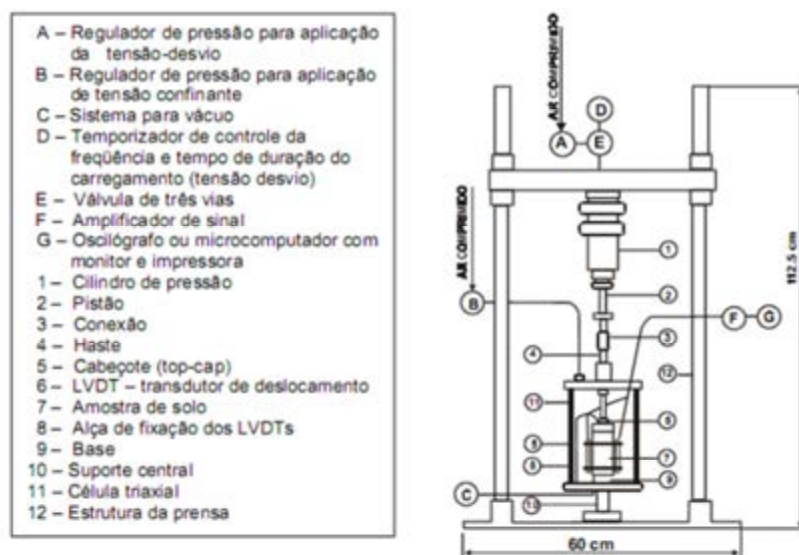


Figura 3.25: Esquema ilustrativo do equipamento de ensaios triaxiais de carga repetida (Medina e Motta, 2005)



Figura 3.26: Equipamento de ensaio triaxial de cargas repetidas do Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ

Quadro 3.1: Pares de tensões utilizados nos ensaios triaxiais de carga repetida para obtenção do módulo de resiliência

Etapa de Condicionamento		
Tensão Confinante σ_3 (MPa)	Tensão Desviadora σ_d (MPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
0,07	0,07	2
0,07	0,21	4
0,105	0,315	4
Etapa de obtenção do Módulo de Resiliência		
Tensão Confinante σ_3 (MPa)	Tensão Desviadora σ_d (MPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
0,021	0,021	2
	0,041	3
	0,062	4
0,034	0,034	2
	0,069	3
	0,103	4
0,051	0,051	2
	0,103	3
	0,154	4
0,069	0,069	2
	0,137	3
	0,206	4
0,103	0,103	2
	0,206	3
	0,309	4
0,137	0,137	2
	0,275	3
	0,412	4

3.4.3.3. Ensaio de Deformação Permanente

O ensaio de deformação permanente foi realizado no mesmo equipamento de ensaio triaxial de cargas repetidas do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da COPPE.

O procedimento de preparação do ensaio de deformação permanente é idêntico ao ensaio de módulo de resiliência. Entretanto, não é realizado o período de condicionamento do corpo de prova, pois todas as deformações permanentes observadas são importantes para a pesquisa, sendo que o programa que gerencia o equipamento triaxial de cargas repetidas já possui um módulo para o ensaio de deformação permanente com este requisito implantado. Também, para cada corpo de prova aplica-se somente um par de tensões durante todo o ensaio.

Faz-se necessária a aplicação de um golpe inicial para garantia de total contato entre o pistão e o *top cap*, evitando que eventuais folgas sejam lidas como deformação permanente. Este golpe inicial será de número zero e a deformação permanente obtida não será considerada como deformação do corpo de prova, sendo o estado de tensões para este golpe padronizado para todos os ensaios e materiais estudados da seguinte maneira: tensão desvio igual a 30kPa e tensão confinante igual a 30kPa.

Segundo Guimarães (2009), deverão ser realizados 9 ensaios válidos de deformação permanente com 9 estados de tensões distintos, permanecendo cada estado de tensão constante ao longo do mesmo ensaio, com pelo menos 150.000 ciclos de aplicação de carga. A quantidade de ensaios prevista no Quadro 3.2, é aquela considerada mínima para uma eficaz modelagem da influência do estado de tensão na deformação permanente, e que devem ser considerados como dados iniciais e sujeitos a alteração na medida em que as interpretações dos resultados forem sendo elaboradas.

Foram realizados ensaios de deformação permanente no solo e pó de pedra, e para estes, todos os CPs foram compactados na umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

Para as melhores misturas obtidas na pesquisa, foi selecionado o maior par de tensões, obtido dos resultados de deformação permanente dos materiais puros para a realização do ensaio. Como as misturas adotadas eram compostas por estabilizantes, determinou-se um tempo de cura de 28 dias para a realização do ensaio.

Quadro 3.2: Relação de tensões utilizadas para o ensaio de deformação permanente
(Guimarães, 2009)

Ensaio	Tensão (kPa)		N
	σ_d	σ_3	
1	40	40	150.000
2	80		
3	120		
4	80	80	
5	160		
6	240		
7	120	120	
8	240		
9	360		

Segundo o Quadro 3.2 para um mesmo nível de tensão confinante são realizados três ensaios tais que a razão σ_d/σ_3 seja 1, 2 e 3 respectivamente, permitindo a avaliação da influência de cada tensão isoladamente.

3.4.3.4. Ensaio de expansão

Para medir a expansão dos materiais e das misturas foram tomados dois procedimentos como descritos a seguir.

- *Norma DNIT 160/2012 – Solos – Determinação da expansibilidade - Método de Ensaio.*

Esta Norma tem por objetivo fixar o procedimento para a determinação da expansibilidade de solos pela medida da variação de volume, expressa em percentagem, da fração do solo que passa na peneira de 0,42mm (nº 40), quando

em condições definidas de compactação absorve água por capilaridade através de uma placa porosa. Este ensaio é conhecido como expansão LNEC.

Escolheu-se este tipo de ensaio por ser de pequeno porte e não exigir muito consumo de material. Foi realizado para o solo, lodo de esgoto e algumas misturas.

O aparelho para determinação da expansibilidade é apresentado na Figura 3.27. O aparelho é montado, colocando sobre a base a placa porosa e fixando a esta o molde com o respectivo colarinho.

O material, passante na peneira 40 e seco em estufa, é compactado em duas camadas aproximadamente iguais, utilizando um soquete de compactação próprio. Cada camada é compactada com 50 compressões aplicadas, uniformemente distribuídas e com a frequência de uma compressão por segundo.

Realizada a compactação, o cilindro complementar é retirado e o material é rasado cuidadosamente com espátula. Monta-se o cilindro complementar e coloca-se sobre o material, uma placa de plástico. O aparelho é então colocado dentro de um recipiente com água destilada que não deve ultrapassar a altura da base do aparelho. A ascensão de água será por capilaridade. São feitas leituras periódicas no extensômetro, até que se tenha duas leituras iguais com intervalo de 2 horas.

A expansibilidade é dada, em percentagem pela seguinte Equação 3.3:

$$\frac{\Delta h}{h_0} \times 100 = \frac{L_1 - L_0}{15} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

Δh – variação de altura;

H_0 – altura inicial = 15mm;

L_0 – leitura inicial do extensômetro;

L_1 – leitura final do extensômetro.



Figura 3.27: Aparelho utilizado para ensaio de expansão LNEC nesta pesquisa

- *Expansão pela Norma DNER-ME 049/94*

Este ensaio é parte do ensaio de Índice Suporte Califórnia (ISC ou CBR) e permite conhecer qual será a expansão de um solo quando estiver próximo à saturação por embebição e submersão em tanque com água por 4 dias, sob uma carga padrão. Os procedimentos do ensaio são os seguintes:

1. Coloca-se o disco espaçador no cilindro de compactação CBR, cobrindo-o com papel filtro;
2. Compacta-se o corpo de prova na umidade ótima e, invertendo-se o cilindro, substitui-se o disco espaçador pelo prato perfurado com haste de expansão e pesos. Esse peso ou sobrecarga corresponderá ao do pavimento e não deverá ser inferior a 4,5kg;
3. Imerge-se o cilindro com o corpo de prova e sobrecarga em tanque durante 96 horas, de tal forma que a água banhe o material tanto pelo topo quanto pela base;
4. Realizam-se leituras de expansão com aproximação de 0,01mm, a cada 24 horas;
5. Terminada a saturação, deixa-se escorrer a água do corpo de prova durante 15 minutos e pesa-se o cilindro + solo úmido.

Na Figura 3.28 está apresentado um corpo de prova imerso para a determinação da expansão. Este ensaio foi realizado para as melhores misturas com estabilizante e também com a mistura de solo-cal, visando avaliar o comportamento na expansão da mistura com resíduo e sem resíduo.



Figura 3.28: Etapa do ensaio de expansão CBR numa amostra deste estudo

3.4.4. Dimensionamento do pavimento

Para a avaliação dos materiais e misturas estudadas, foi utilizado o Programa SisPav (FRANCO, 2007), que é um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, que utiliza a rotina de cálculo denominada Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) para obter tensões e deformações devido aos carregamentos dos veículos.

Os danos considerados para efeito de dimensionamento do pavimento são: a deformação permanente limite no topo do subleito, a deflexão máxima na superfície do pavimento, e o dano de fadiga da camada asfáltica ou cimentada.

O programa utiliza as características brasileiras de ensaios de laboratório, de clima, de materiais de pavimentação e de tráfego, conforme mostrado no fluxograma da Figura 3.29.

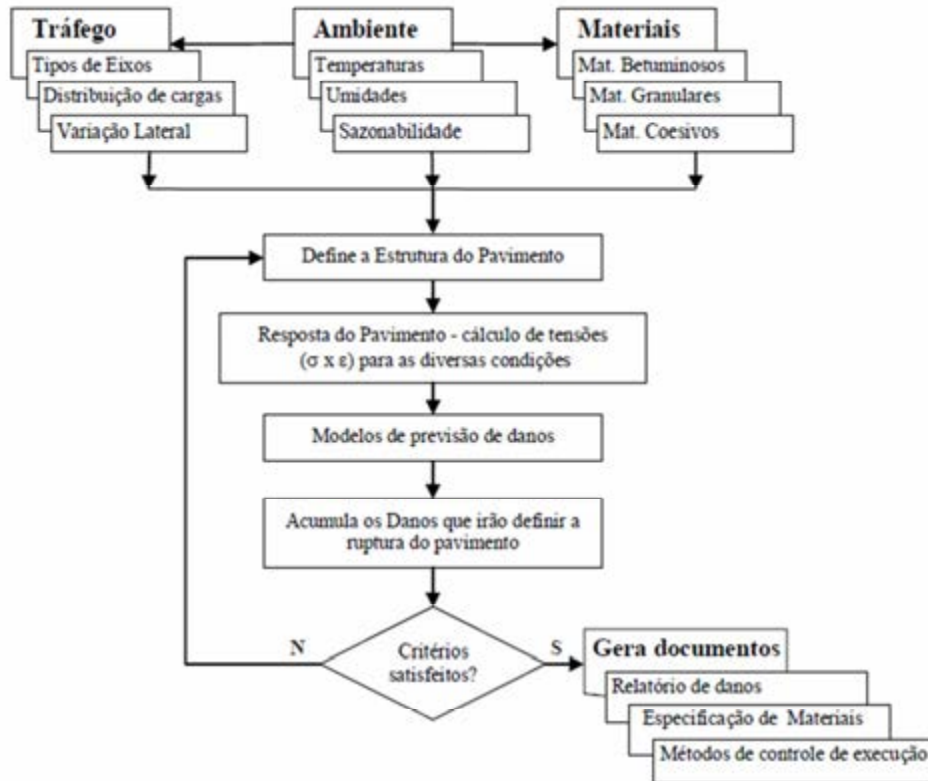


Figura 3.29: Fluxograma do método integrado de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos (FRANCO, 2007)

Para a presente pesquisa, foi utilizada uma versão modificada do SisPav, feitas por Franco (2013). Foi considerada uma estrutura de pavimento, mantendo constantes as propriedades mecânicas do revestimento asfáltico, variando os valores de módulo de resiliência do subleito e dimensionadas as espessuras das camadas de base e sub-base, de acordo com os parâmetros de resiliência para as misturas estudadas.

Os dados de tráfego inseridos no programa foram com base no eixo padrão, e são correspondentes a uma rodovia de baixo volume de tráfego ou ruas de tráfego moderado, e os dados de clima foram característicos da cidade do Rio de Janeiro, que já estão inseridos na base de dados do SisPav.

Através dos resultados obtidos, foi avaliado o comportamento mecânico e a viabilidade técnica e econômica para aplicação das misturas estudadas compondo as camadas de base e/ou sub-bases do pavimento.

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados e discutidos os resultados dos ensaios descritos no capítulo anterior, para as amostras de solo, pó de pedra, lodo de ETE e misturas estudadas. Além disso, será avaliada a viabilidade da utilização do resíduo lodo de esgoto em misturas com solo ou pó de pedra, sem uso de estabilizantes e com o uso de estabilizantes para utilização em camadas de base e/ou sub-base de pavimentos.

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.1.1. Massa específica real dos grãos

Na Tabela 4.1 estão apresentados os resultados obtidos da massa específica real dos grãos dos materiais utilizados na pesquisa.

Tabela 4.1: Resultados de massa específica real dos grãos dos materiais desta pesquisa

Material	Massa específica real dos grãos (g/cm ³)
Solo	2,65
Pó de pedra	2,54
Lodo de ETE (1)	1,68
Lodo de ETE (2)	1,66
Cinza de Lodo de ETE	2,74

Os valores obtidos de massa específica real dos grãos do solo e pó de pedra estão de acordo com o esperado. Na literatura encontram-se valores de massa específica na ordem de 2,65g/cm³ para o quartzo, principal componente destes materiais.

Quanto ao lodo de esgoto, pode-se perceber que tanto para a amostra da primeira coleta quanto para a amostra da segunda coleta, os valores de massa

específica real dos grãos obtidos são muito próximos. Lucena (2012) encontrou valor de $1,95\text{g/cm}^3$ de massa específica real dos grãos para o lodo de ETE do Cabanga em Recife-PE, acima dos valores obtidos nesta pesquisa. Esta diferença pode ser atribuída às características do esgoto de cada região, e também ao sistema de tratamento utilizado nas estações de cada local.

A massa específica real dos grãos obtida para a cinza de lodo de ETE foi de $2,74\text{g/cm}^3$, compatível com a literatura. Geyer (2001) em seu estudo com cinza de lodo de esgoto da ETE IAPI de Porto Alegre-RS encontrou valor de massa específica de $2,65\text{g/cm}^3$. Pereira (2012) obteve valor de $2,52\text{g/cm}^3$ para cinza de lodo de esgoto proveniente de lagoa de estabilização anaeróbica de empresa de Limpa Fossa no município de Natal-RN e Fontes (2003) obteve valor de $2,68\text{g/cm}^3$ para cinza de lodo de esgoto proveniente da ETE Alegria, mesmo local do resíduo estudado nesta pesquisa. Pode ter tido diferença também na temperatura de queima em cada um destes trabalhos citados.

4.1.2. Limites de Atterberg

Na Tabela 4.2 estão apresentados os resultados obtidos dos limites de Atterberg do solo, lodo de ETE in natura, lodo seco a 60°C e calcinado a 550°C . Os limites de Atterberg do lodo de ETE in natura e seco a 60°C foram realizados com a amostra da segunda coleta, já que esta foi utilizada para a confecção dos corpos de prova das misturas definitivas.

Tabela 4.2: Resultados de limites de Atterberg dos materiais

Material	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo	46	21,7	24,3
Lodo in natura	483	112	371
Lodo seco a 60°C	Não plástico		
Cinza de lodo de ETE	Não plástico		

O solo estudado corresponde a um material com limites de liquidez e índice de plasticidade acima do recomendado para uso em camada de base de pavimento, que deve ter limite de liquidez menor que 25% e índice de plasticidade

menor ou igual a 6% para base. Para sub-base estes limites são maiores ou nem são exigidos dependendo do órgão.

O lodo de esgoto in natura apresentou altíssimos valores de LL e LP. Para a realização deste ensaio foram necessários vários pontos para traçar o gráfico de Limite de Liquidez *versus* N^o de Golpes, devido ao material absorver rapidamente a água, como se fosse uma esponja. Este comportamento pode ser explicado pelo alto teor de matéria orgânica do resíduo.

Este mesmo lodo foi seco em estufa a 60°C, destorroado, passado na peneira n^o 40 (0,42mm) e realizado os ensaios de Limites de Atterberg. Porém, quando adicionada a água no resíduo, observou-se uma repulsão e o material não conseguiu se misturar com a água, não sendo possível realizar o ensaio, assim o material foi classificado como não plástico.

A cinza de lodo de ETE também apresentou comportamento não plástico. Esse comportamento foi obtido em outros trabalhos no estudo da cinza tais como Geyer (2001) e Pereira (2012).

4.1.3. Análise granulométrica

Na Figura 4.1 estão apresentadas as granulometrias dos materiais utilizados na presente pesquisa.

Utilizando a análise da curva granulométrica do solo e também dos limites de Atterberg, pode-se classificar este solo segundo a Classificação Unificada, como um solo SC, ou seja, uma areia argilosa. No sistema HRB, o solo é classificado como A-7-6, ou seja, de comportamento ruim e não recomendável para subleito. Pelo valor do IG obtido de 7,3 esse solo é classificado como de comportamento mecânico regular a mau para material de fundação de pavimento.

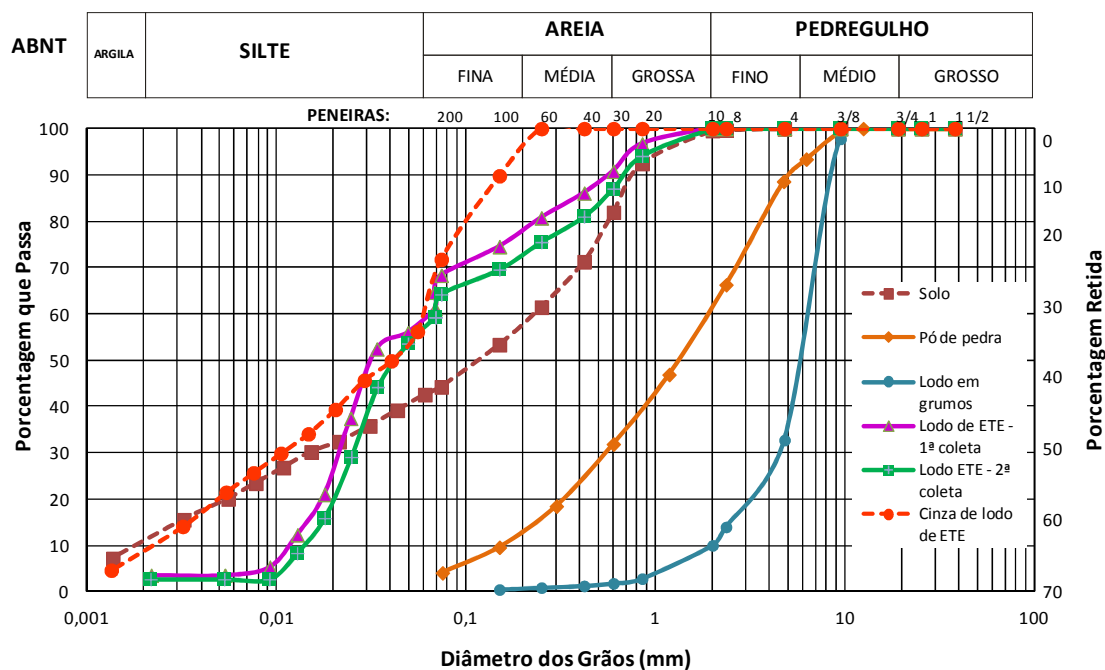


Figura 4.1: Curvas granulométricas dos materiais deste estudo

O pó de pedra classifica-se segundo a classificação Unificada como GW, pedregulho bem graduado e na classificação HRB é um material A-2-4. Pelo valor de IG=0, este material é classificado como excelente material para subleito.

Quanto às amostras de lodo de esgoto, tanto da primeira coleta quanto da segunda coleta, ambas obtiveram granulometrias muito próximas, com predominância de material siltoso (59%). Já a granulometria do lodo em grumos, apresentou maior predominância de pedregulho, ou seja, com dimensões dos grumos superiores a 2,0mm.

A cinza de lodo de esgoto apresentou cerca de 75% de material passante na peneira nº 200. Segundo a Classificação Unificada, esta cinza é classificada com ML – silte com baixa compressibilidade e no Sistema HRB é classificada como A-4, solo siltoso.

4.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E AMBIENTAL

4.2.1.1. Ensaio físico-químico e bacteriológico do lodo de esgoto

Para a caracterização do lodo de esgoto foram realizados ensaios de caracterização físico - química e bacteriológicos, tais como: umidade, sólidos totais, sólidos voláteis, sólidos fixos, coliformes termotolerantes, ovos de helmintos e salmonella.

Na Tabela 4.3, estão apresentados os resultados obtidos das duas amostras de lodo coletadas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA) da UFRJ. Os relatórios estão apresentados no Anexo A.

Tabela 4.3: Resultados dos ensaios físico-químicos e bacteriológicos das amostras de lodo de esgoto deste estudo

Ensaio	Lodo de esgoto -ETE Alegria	
	1ª Coleta	2ª coleta
Coli. Termotolerantes NMP/100ml	0	24.000
ST (mg/L)	243.584	155.353,30
SF (mg/L)	120.270	101.740
SV (mg/L)	123.315	53.613,30
SV/ST	0,506	0,345
Umidade (%)	74,80%	78,20%

O lodo é composto por sólidos e água. Os sólidos totais (ST) dividem-se em sólidos dissolvidos e sólidos em suspensão. Quanto a matéria orgânica, os sólidos totais se dividem em sólidos fixos ou inorgânicos (SF) e sólidos voláteis ou orgânicos (SV), sendo a relação (SV/ST), uma indicação do teor de matéria orgânica.

Na Tabela 4.3 estão apresentadas as relações SV/ST, na qual indicam um teor de matéria orgânica de 50,6% para a primeira coleta, e 34,5% para a segunda

coleta. O teor de sólidos é dado na forma de sólidos secos em relação ao lodo (sólidos+água), e expresso em mg/L.

A umidade influi nas propriedades mecânicas do lodo, e estas por sua vez influenciam no seu manuseio e disposição final, bem como no seu volume. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.3, as duas amostras de lodo obtiveram umidades superiores a 70%. Vale comentar que esta avaliação de umidade é feita de forma diferente do habitual da geotecnia. A umidade é obtida pela relação do peso da água com o peso úmido da amostra, utilizando temperatura em estufa de 65°C.

A umidade também foi determinada segundo a metodologia utilizada na geotecnia, na qual uma amostra de lodo no seu estado natural foi seca em estufa a 60°C até constância de massa. A umidade foi determinada pela relação entre o peso da água e o peso seco da amostra. Os valores obtidos para a amostra da primeira coleta e para a amostra da segunda coleta foram de 336% e 384% respectivamente.

Na primeira coleta da pesquisa, a amostra foi enviada para estes ensaios alguns dias após a coleta, e, provavelmente por isto, acabou perdendo algumas de suas características, como por exemplo, os coliformes termotolerantes que não foram possíveis de contabilizar na análise.

Já na segunda coleta, a amostra assim que foi coletada foi levada imediatamente para o Laboratório de Engenharia e Meio Ambiente (LEMA) da UFRJ, e apresentou cerca de 24000 NMP/100ml de coliformes termotolerantes.

Vendo a necessidade de estudar outros elementos patogênicos, que neste laboratório não puderam ser observados, foi realizada uma nova coleta de lodo visando caracterizar o resíduo segundo o CONAMA 375. Os ensaios de coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos e salmonela foram realizados pela Empresa INNOLAB do Brasil Ltda. Não foi possível realizar ensaio de vírus entéricos, pois não foi encontrado local para realizar o mesmo.

Na Tabela 4.4 encontram-se os resultados obtidos, e pode-se ver que não foi detectada a presença de ovos viáveis de helmintos e salmonela. Quanto aos

coliformes termotolerantes foi apresentado 2,1 NMP/100ml. A Resolução Conama nº 375 utiliza unidade de NMP/g de ST, e no ensaio foi dado em NMP/100ml, então não foi possível fazer comparação.

Tabela 4.4: Resultados das análises microbiológicas da terceira coleta de lodo de esgoto

Parâmetro	Resultado	Unidade	Método
Ovos viáveis de helmintos	Ausência	-	--
Pesquisa de Salmonella	Ausência	-	--
Coliformes Termotolerantes	2,1	NMP/100ml	--

Lucena (2012), encontrou cerca de $6,4 \times 10^6$ NMP/100ml, ou seja, valor bem superior ao encontrado nas análises do lodo do presente estudo. Isto pode ser devido às diferenças de tratamento nas duas ETEs.

4.2.2. Teor de matéria orgânica

Conforme comentado no Capítulo 3, foram utilizados dois métodos para determinação da matéria orgânica: método do carbono orgânico e método por ignição utilizando a Norma NBR 13.600/1996.

O método do carbono orgânico foi utilizado para determinação da matéria orgânica do solo e o método por ignição para as duas amostras de lodo de esgoto. Os resultados encontram-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Resultados de matéria orgânica

Amostra	Matéria orgânica (%)
Solo	4,2
Lodo de ETE - primeira coleta	47,19
Lodo de ETE - segunda coleta	51,2

Observa-se que o solo utilizado neste estudo apresenta um teor baixo de matéria orgânica, comparado ao lodo de esgoto, que apresentou percentagens de 47,19% para a primeira coleta, e 51,2% para a segunda coleta.

A presença de matéria orgânica tem influência no processo de estabilização dos materiais, retardando as reações e produzindo pequenos ganhos de resistência. Segundo Queiroz de Carvalho (1979) citado por Lovato (2004), os menores ganhos de resistência ocorrem em solos com maior teor de matéria orgânica.

4.2.3. Análise Termodiferencial (ATD) e Análise Termogravimétrica (ATG)

A análise termodiferencial (ATD) e a análise termogravimétrica (ATG) foram realizadas em conjunto na amostra de lodo de esgoto da segunda coleta. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.2.

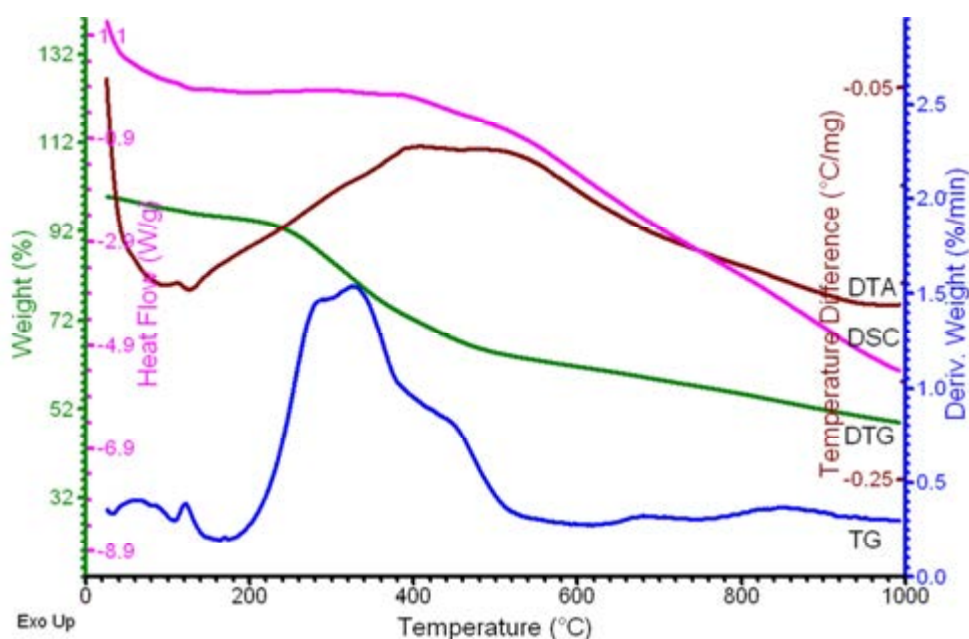


Figura 4.2: Análise Termodiferencial e Termogravimétrica do lodo de ETE da segunda coleta deste estudo

Na ATD verificam-se transformações endotérmicas e exotérmicas. As transformações endotérmicas se referem normalmente à desidratação (perda de umidade, água adsorvida). Já as transformações exotérmicas se devem a oxidação, reconstrução da estrutura cristalina, etc.

Na Figura 4.2 pode-se notar que houve uma queima intensa de orgânicos em função do elevado teor de matéria orgânica do lodo. Essa reação exotérmica teve picos máximos nas temperaturas entre 400°C e 600°C. As reações endotérmicas não são preponderantes em relação às reações exotérmicas. De acordo com Smothers e Chiang (1952) *apud* Santos (1975), os efeitos exotérmicos causados pela pirólise e combustão da matéria orgânica são frequentemente tão pronunciados que chegam a reduzir e mesmo eliminar algum efeito endotérmico que ocorra simultaneamente.

A temperatura de 550°C que foi utilizada na mufla para a calcinação do lodo está dentro do intervalo de maior perda de massa do lodo e garantiu, portanto, uma boa queima da matéria orgânica presente no resíduo. Como o lodo tem presença de minerais em sua composição a quantidade de resíduo ainda é grande, garantindo a formação de um volume razoável de cinzas.

Na curva termogravimétrica (DTG), observa-se uma perda de massa de 51% do material devido à perda de água, matéria orgânica e hidroxilas, sendo que a maior perda ocorreu nas temperaturas de 200°C a 500°C. Observa-se que mesmo na temperatura de 1000°C, o material ainda continua perdendo massa, não apresentando acomodamento.

4.2.4. Composição química

Na Tabela 4.6, estão apresentadas as análises químicas dos materiais utilizados na presente pesquisa.

Tabela 4.6: Análise química semiquantitativa em porcentagem dos materiais utilizados na pesquisa

Composto	Solo	Pó de Pedra	Lodo de ETE Primeira coleta	Lodo de ETE Segunda coleta	Lodo calcinado 550°C
SiO ₂	42,9	60,7	20,5	16,1	37,7
Al ₂ O ₃	35,3	15,6	9,9	8,4	19,4
Fe ₂ O ₃	6,8	5,1	5,4	5,8	9,6
SO ₃	0,1	0,1	7,3	6,3	7,1
CaO	0	4,1	5,1	4,6	6,4
TiO ₂	1,1	0,7	0,7	0,6	0,4
MnO	0,1	0,1	0,1	0,05	0,1
P ₂ O ₅	0,1	0,7	3	2,9	6,8
Na ₂ O	0,04	3	0,4	0,3	0,6
MgO	0,1	1,7	1,3	1,2	2,4
ZrO ₂	0,1	0,1	0,04	0,02	0,1
Cl	0,01	0,04	0,1	0,1	0,1
CuO	ND	ND	0,1	0,1	0,1
ZnO	ND	ND	0,2	0,2	0,4
SrO	ND	0,04	0,02	0,01	0,03
BaO	ND	0,1	0,03	0,02	0,1
PbO	ND	ND	0,03	0,05	0,1
CeO ₂	0,05	0,05	ND	ND	ND
K ₂ O	0,3	4,8	1,1	0,9	1,8
Cr ₂ O ₃	ND	ND	0,02	0,02	0,04

Os principais compostos encontrados no solo e no pó de pedra foram dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), que são os principais componentes ativos no processo de estabilização. A maior quantidade foi de SiO₂, que representou cerca de 42,9% para o solo e 60,7% para o pó de pedra.

Os resultados indicam que os principais componentes do lodo de ETE tanto na primeira coleta quanto na segunda coleta são: dióxido de silício (SiO₂), alumina ou óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido de cálcio (CaO) e trióxido de enxofre (SO₃).

Ao calcinar o lodo de ETE da segunda coleta pode-se observar um aumento dos compostos químicos. Apesar destes compostos já estarem presentes no lodo “in natura”, pode-se dizer que a volatilização de determinadas substâncias,

acabou gerando um aumento na concentração destes compostos, ficando retidos na cinza de lodo de ETE.

A cinza obtida apresentou cor marrom avermelhado, que segundo Geyer (2001), demonstra a presença de óxido de ferro. Algumas partículas são brilhosas demonstrando a presença de quartzo.

Destaca-se o dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), como os principais compostos da cinza, perfazendo cerca de 66,7%. Segundo Geyer (2001), os teores de silício, cálcio, ferro e alumínio podem indicar preliminarmente uma eventual reatividade do material, sob o ponto de vista de aproveitamento de material cimentante ou pozolânico.

Nas amostras de lodo e cinza, a presença de Cromo (Cr), cuja concentração ultrapassa o limite de 0,01% estabelecido na NBR 10.004 – Classificação de Resíduos Sólidos (ABNT, 1987), na sua listagem do Anexo I, podem indicar que estas amostras de material sejam patogênicas e perigosas, caso os mesmos sejam lixiviáveis ou solúveis no local de disposição. Segundo a norma, os valores apresentados na Listagem 9 do Anexo I, podem ser usados como parâmetros indicativos, logo não é absoluto.

Na Tabela 4.7 estão apresentados para efeito de comparação, os resultados de outros trabalhos que utilizaram cinza de lodo de ETE e lodo in natura. Observa-se uma pequena variabilidade entre as concentrações dos principais elementos químicos da cinza estudada por Fontes (2003) comparada à presente pesquisa. Já a cinza de lodo de esgoto obtida por Geyer (2001), apresentou maior quantidade de sílica.

Quanto aos trabalhos de Pereira (2012), Medeiros (2006) e Duarte (2008), observa-se que a concentração dos compostos químicos variou muito pouco. Porém, os valores obtidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 foram superiores aos da presente pesquisa.

Tabela 4.7: Análise química da cinza de lodo e lodo in natura da literatura em percentagem

Composto	Cinza de lodo		Lodo in natura		
	Fontes (2003)	Geyer (2001)	Pereira (2012)	Medeiros (2006)	Duarte (2008)
SiO ₂	39,02	54	30,74	38,31	33,89
Al ₂ O ₃	19,09	17	14,51	15,84	16,24
Fe ₂ O ₃	12,48	6,7	19,55	11,56	12,89
SO ₃	6,38	2,4	7,79	11,18	-
CaO	10,12	7,8	10,97	12,49	14,56
TiO ₂	-	-	3,32	2,21	2,87
MnO	-	-	0,12	0,1	-
P ₂ O ₅	4,94	2,6	4,75	2,95	-
Na ₂ O	1,26	1,26	-	-	-
MgO	1,89	3,6	0,12	2,01	-
ZrO ₂	-	-	0,38	0,17	-
CuO	-	-	0,53	0,31	-
ZnO	-	-	1,88	1,09	-
SrO	-	-	0,09	0,07	-
K ₂ O	1,76	2,1	1,45	1,57	1,509
Cr ₂ O ₃	-	-		0,06	-
NiO	-	-	0,05	0,09	-
SnO ₂	-	-	2,37	-	-
Outros	2,56	0,84	-	-	16,59

4.2.5. Análise mineralógica

Nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, e 4.7 estão apresentados, respectivamente, os espectros de difração de raio X dos materiais estudados: solo, pó de pedra, lodo (1^a e 2^a coleta) e lodo calcinado a 550°C.

No Anexo B estão apresentados os gráficos com a identificação dos minerais, emitidos pelo CETEM.

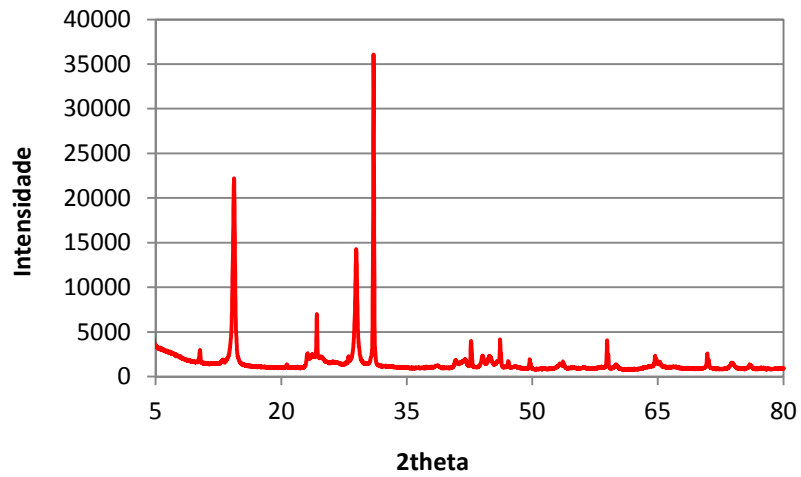


Figura 4.3: Difração de raio X do solo deste estudo

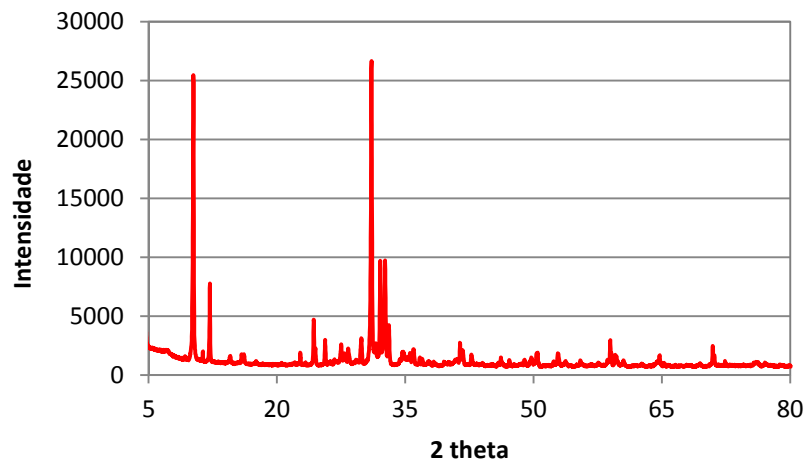


Figura 4.4: Difração de raio X do pó de pedra deste estudo

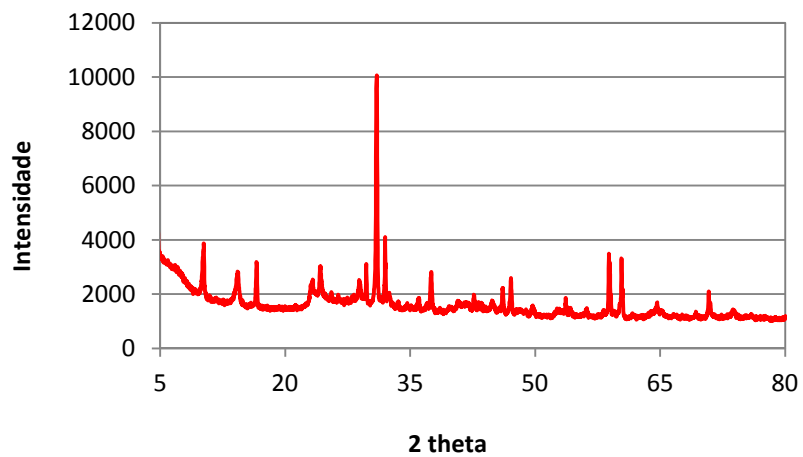


Figura 4.5: Difração de raio X do lodo de esgoto - primeira coleta deste estudo

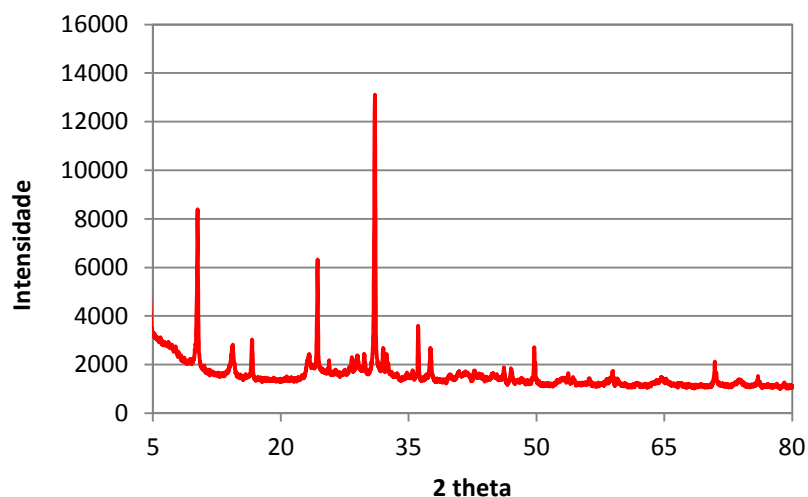


Figura 4.6: Difração de raio X do lodo – 2ª coleta deste estudo

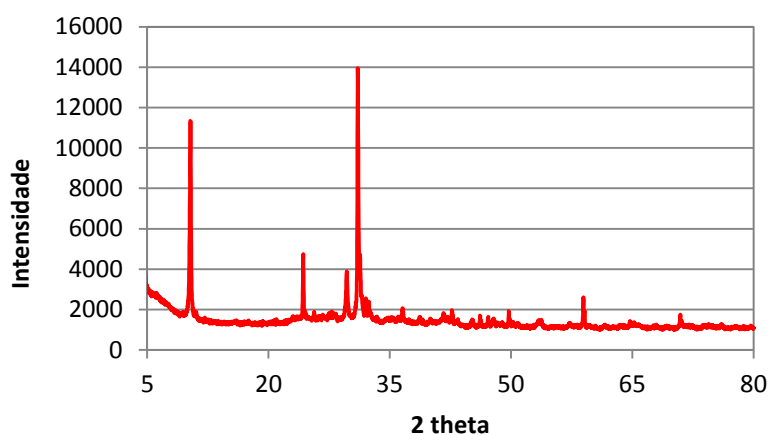


Figura 4.7: Difração de raio X do lodo calcinado deste estudo

Foram encontrados no solo os seguintes minerais em maior predominância: quartzo e caulinita e em menor predominância muscovita e hematita.

No pó de pedra foram encontrados em maior predominância quartzo, diquite, albite e muscovita, em menor predominância: microlina, dolomita, arkerite, haloisita, e outros.

As amostras de lodo, tanto da primeira coleta quanto da segunda coleta apresentaram os mesmos minerais, são eles: quartzo, caulinita, haloisita, muscovita, dolomita, microlina, albite e anordita. O mineral hematita apareceu somente na amostra da primeira coleta. Os minerais em maior predominância nas duas amostras foram o quartzo e a caulinita.

Os resultados obtidos estão compatíveis com outras pesquisas que também estudaram o lodo de esgoto. Lucena (2012) encontrou quartzo, caulinita, anortita e ilita no lodo de Recife.

Fontes (2003) analisou amostras de lodo in natura da ETE Alegria e identificou quartzo, caulinita, muscovita e goetita. A autora constatou que o material estava mal cristalizado, apresentando uma contagem baixa, com picos de pequena intensidade.

Lessa (2005) encontrou nas amostras in natura de lodo da ETE da cidade de Osório-RS, quartzo, gipsita e plagioclásio.

Para a cinza de lodo de ETE do presente estudo foram encontrados em maior predominância quartzo, anidrido e muscovita, e em menor predominância, hematita, anordita.

Fontes (2003) encontrou na amostra de cinza de lodo de esgoto queimada a 550°C, quartzo, caulinita, muscovita e dolomita.

4.2.6. Ensaio de lixiviação e solubilização

4.2.6.1. Lodo in natura

A classificação do lodo de ETE sob o ponto de vista ambiental foi realizada segundo a NBR 10.004/2004, pelo Laboratório INNOLAB do Brasil Ltda. Foram determinados a inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade do resíduo.

Na Tabela 4.8 estão apresentados os parâmetros pH, cianeto liberável, sulfeto liberável e ponto de fulgor. Os resultados apontam o resíduo como não corrosivo, não reativo e não inflamável.

Tabela 4.8: Resultados da corrosividade, reatividade e inflamabilidade do lodo de ETE deste estudo

Parâmetros	Massa Bruta		
	Resultado	Unidade	Conclusão
pH	7	-	não corrosivo
Cianeto liberável	Nd	mg/kg	não reativo
Sulfeto liberável	383,2	mg/kg	não reativo
Ponto de fulgor	>100	°C	não inflamável

Nas Tabelas 4.9 a 4.11 estão apresentados os resultados do ensaio de lixiviação realizado em conformidade a NBR 10.005/2004 e nas Tabelas 4.12 e 4.13 estão apresentados os resultados da caracterização química dos compostos solubilizados segundo a NBR 10.006/2004, bem como os limites da NBR 10.004/2004.

Tabela 4.9: Resultados dos ensaios de lixiviação- parâmetros inorgânicos do lodo de esgoto deste estudo

Parâmetros	Resultado (mg/L)	L.M.L (mg/L) NBR 10.004/2004	Metodologia de Referência
Inorgânico			
Arsênio	N.D.	1,0	SM 3030F e 3120B
Bário	N.D.	70,0	SM 3030F e 3120B
Cádmio	0,002	0,5	SM 3030F e 3120B
Chumbo	N.D.	1,0	SM 3030F e 3120B
Cromo total	0,004	5,0	SM 3030F e 3120B
Mercúrio	N.D.	0,1	SM 3112B
Prata	N.D.	5,0	SM 3030F e 3120B
Fluoreto	N.D.	150,0	SM 4500 - FC
Selênio	N.D.	1,0	SM 3030F e 3120B

*N.D. = não detectado

Tabela 4.10: Resultados dos ensaios de lixiviação – parâmetros pesticidas do lodo deste estudo

Parâmetros	Resultado (mg/L)	L.M.L (mg/L) NBR 10.004/2004	Metodologia de Referência
Pesticidas			
Aldrin	N.D.	0,003	USEPA 8270
Dieldrin	N.D.	0,2	USEPA 8270
DDD			
DDE			
Endrin	N.D.	0,06	USEPA 8270
Lindano	N.D.	0,2	USEPA 8270
Metoxicloro	N.D.	2,0	USEPA 8270
Clordano (isômeros)	N.D.	0,02	USEPA 8270
2,4-D	N.D.	3,0	USEPA 8270
Heptacloro	N. D	0,003	USEPA 8270
Heptacloro epóxido			
Metoxicloro	N.D.	2,0	USEPA 8270
Toxafeno	N.D.	0,5	USEPA 8270
2,4,5-T	N.D.	0,2	USEPA 8270
2,4,5-TP	N.D.	1,0	USEPA 8270
Pentaclorofenol	N.D.	0,9	USEPA 8270

*N.D = não detectado

Tabela 4.11: Resultados dos ensaios de lixiviação – parâmetros outros orgânicos do lodo deste estudo

Parâmetros	Resultado (mg/L)	L.M.L (mg/L) NBR 10.004/2004	Metodologia de Referência
Outros orgânicos			
Benzeno	N.D.	0,5	USEPA 5021A e 8260C
Benzo (a)ireno	N.D.	0,07	USEPA 8270
Cloreto de vinila	N.D.	0,5	USEPA 5021A e 8260C
Clorobenzeno	N.D.	100	USEPA 5021A e 8260C
Clorofórmio	N.D.	6	USEPA 5021A e 8260C
Cresol total	N.D.	200	USEPA 8270
o-cresol	N.D.	200	USEPA 8270
m-cresol	N.D.	200	USEPA 8270
p-cresol	N.D.	200	USEPA 8270
1,4-diclorobenzeno	N.D.	7,5	USEPA 5021A e 8260C
1,2-dicloroetano	N.D.	1	USEPA 5021A e 8260C

1,1-dicloroetileno	N.D.	3	USEPA 5021A e 8260C
hexaclorobenzeno	N.D.	0,1	USEPA 8270
hexaclorobutadieno	N.D.	0,5	USEPA 8270
hexacloroetano	N.D.	3,0	USEPA 8270
metiletilcetona	N.D.	200,0	USEPA 8270
nitrobenzeno	N.D.	2,0	USEPA 8270
piridina	N.D.	5,0	USEPA 8270
tetracloroeto de carbono	N.D.	0,2	USEPA 5021A e 8260C
tetracloroeteno	N.D.	4	USEPA 5021A e 8260C
tricloroetileno	N.D.	7	USEPA 5021A e 8260C
2,4,5-triclorofenol	N.D.	400	USEPA 8270
2,4,6-triclorofenol	N.D.	20	USEPA 8270

*N.D. = não detectado

Tabela 4.12: Resultados dos ensaios de solubilização – parâmetros inorgânicos do lodo deste estudo

Parâmetros	Resultado (mg/L)	L.M.S (mg/L) NBR 10.004/2004	Metodologia de Referência
Inorgânico			
Arsênio	N.D.	0,01	SM 3030F e 3120B
Alumínio	N.D.	0,2	SM 3030F e 3120B
Bário	N.D.	0,7	SM 3030F e 3120B
Cádmio	N.D.	0,005	SM 3030F e 3120B
Chumbo	0,007	0,01	SM 3030F e 3120B
Cloreto	12	250,0	USEPA 9212
Fluoreto	N.D.	1,5	SM 4500-F· C
Cianeto	N.D.	0,07	SM 4500-CN· C e D
Sulfato	107,0	250,0	SM 4500-SO ₄ ²⁻ E
Sulfactantes	2,26	0,5	SM 5540C
Cobre	N.D.	2,0	SM 3030F e 3120B
Cromo total	N.D.	0,05	SM 3030F e 3120B
Ferro	0,17	0,3	SM 3030F e 3120B
Manganês	0,045	0,1	SM 3030F e 3120B
Mercurio	N.D.	0,001	SM 3112B
Nitrato	0,9	10,0	MA-017-L2
Prata	N.D.	0,05	SM 3030F e 3120B
Selênio	N.D.	0,01	SM 3030F e 3120B
Sódio	23,24	200,0	SM 3030F e 3120B
Zinco	N.D.	5,0	SM 3030F e 3120B

*N.D. = não detectado

Tabela 4.13: Resultados dos ensaios de solubilização – parâmetros orgânicos do lodo deste estudo

Parâmetros	Resultado (mg/L)	L.M.S (mg/L) NBR 10.004/2004	Metodologia de Referência
Orgânicos			
Aldrin	N.D.	0,00003	USEPA 8270
Dieldrin			
DDT	N.D.	0,002	USEPA 8270
DDD			
DDE			
Endrin	N.D.	0,0006	USEPA 8270
Lindano	N.D.	0,002	USEPA 8270
Fenóis totais	N.D.	0,01	MA-013-L2
Clordano (isômeros)	N.D.	0,0002	USEPA 8270
2,4-D	N.D.	0,03	USEPA 8270
Heptacloro	N.D.	0,00003	USEPA 8270
Heptacloro epóxido			USEPA 8270
Metoxicloro	N.D.	0,02	USEPA 8270
Toxafeno	N.D.	0,005	USEPA 8270
2,4,5-T	N.D.	0,002	USEPA 8270
2,4,5-TP	N.D.	0,03	USEPA 8270
Hexaclorobenzeno	N.D.	0,001	USEPA 8270

*N.D. = não detectado

Os resultados mostraram que as concentrações de todos os compostos lixiviados do lodo in natura da ETE Alegria apresentaram-se abaixo dos valores estabelecidos pelo Anexo F da NBR 10.004/2004.

Para os resultados obtidos do ensaio de solubilização, o único elemento que apresentou concentração superior ao estabelecido pelo Anexo G da NBR 10.004/2004, foi o de surfactantes. Os surfactantes são constituídos por moléculas orgânicas com a propriedade de formar espuma no corpo receptor ou na estação de tratamento em que o esgoto é lançado. Tendem a se agregar à interface ar-água, e nas unidades de aeração aderem à superfície das bolhas de ar, formando uma espuma muito estável e difícil de ser quebrada. O tipo mais comum é o chamado ABS (Alquil – Benzeno – Sulfonado), típico dos detergentes sintéticos e que apresenta resistência a ação biológica; este tipo vem sendo substituído pelos do tipo “LAS”(Alquil – Sulfonado – Linear) que é biodegradável.

Com estes resultados, segundo a referida norma, o resíduo lodo de ETE in natura pode ser classificado como **Resíduo Não Perigoso, Classe II A - Não Inerte**.

Os relatórios completos emitidos pela empresa encontram-se no Anexo C desta dissertação.

4.2.6.2. Lodo calcinado a 550°C

A cinza de lodo de esgoto também foi classificada segundo a NBR 10004/2004. Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados pelo Laboratório INNOLAB e os resultados obtidos encontram-se nas Tabelas 4.15 e 4.16. Os relatórios completos emitidos pela empresa encontram-se também no Anexo C desta dissertação.

Na Tabela 4.14 estão apresentados os parâmetros pH, cianeto liberável, sulfeto liberável e ponto de fulgor. Os resultados apontam a cinza como não corrosiva, não reativa e não inflamável.

Tabela 4.14: Resultados da corrosividade, reatividade e inflamabilidade da cinza do lodo de ETE deste estudo

Parâmetros	Resultado	Unidade	Conclusão
Ph	6,54	-	não corrosivo
Cianeto liberável	nd	mg/kg	não reativo
Sulfeto liberável	0,43	mg/kg	não reativo
Ponto de fulgor	>100	°C	não inflamável

Tabela 4.15: Resultados de lixiviação da cinza de lodo de ETE deste estudo

Parâmetros	Resultado (mg/L)	L.M.L (mg/L) NBR 10.004/2004	Metodologia de Referência
Inorgânico			
Arsênio	ND	1	MA-071-L2
Bário	0,1	70	MA-071-L2
Cádmio	0,038	0,5	MA-071-L2
Chumbo	0,077	1	MA-071-L2
Cromo total	0,004	5	MA-071-L2
Mercúrio	ND	0,1	MA-071-L2
Prata	0,003	5	MA-071-L2
Fluoreto	ND	150	APHA-AWWA-21ªEd. -4500F-C
Selênio	ND	1	MA-071-L2

Tabela 4.16: Resultados de solubilização da cinza de lodo de ETE deste estudo

Parâmetros	Resultado (mg/L)	L.M.S (mg/L) NBR 10.004/2004	Metodologia de Referência
Inorgânico			
Arsênio	ND	0,01	SM 3030F e 3120B
Alumínio	ND	0,2	SM 3030F e 3120B
Bário	0,06	0,7	SM 3030F e 3120B
Cádmio	ND	0,005	SM 3030F e 3120B
Chumbo	ND	0,01	SM 3030F e 3120B
Cloreto	64,26	250	USEPA 9212
Fluoreto	ND	1,5	SM 4500-F- C
Cianeto	<0,20	0,07	SM 4500-CN- C e D
Sulfato	3440,23	250	SM 4500-SO ₄ ²⁻ E
Cobre	ND	2	SM 3030F e 3120B
Cromo total	ND	0,05	SM 3030F e 3120B
Ferro	ND	0,3	SM 3030F e 3120B
Manganês	0,374	0,1	SM 3030F e 3120B
Mercúrio	ND	0,001	SM 3112B
Nitrato	0,02	10	MA-017-L2
Prata	0,004	0,05	SM 3030F e 3120B
Selênio	<0,010	0,01	SM 3030F e 3120B
Sódio	4,68	200	SM 3030F e 3120B
Zinco	0,042	5	SM 3030F e 3120B

Tendo em vista os resultados das Tabelas 4.15 e 4.16, de acordo com as diretrizes dos Anexos F e G da NBR 10.004/2004 que regem os valores máximos permitidos nos ensaios de Lixiviação e Solubilização, respectivamente, a cinza de lodo de ETE foi classificada como pertencente à **Classe II A – Resíduo Não Inerte**. A cinza de lodo de ETE recebeu tal classificação por ter apresentado no Ensaio de Solubilização, concentrações superiores às máximas permitidas por norma, de Sulfato e Manganês.

Fontes (2003), também classificou a cinza de lodo da ETE Alegria como Resíduo Classe II A - Resíduo Não Inerte. Os resultados apontaram no ensaio de solubilização, que alguns poluentes apresentaram concentrações superiores permitidas pela NBR 10004/2004, tais como: dureza, sulfato e manganês. Segundo a autora a presença destes poluentes nos resíduos sólidos indica que os mesmos estão acima do limite permitido como padrão de potabilidade da água. Porém, os mesmos não oferecem riscos ao meio ambiente e a saúde pública.

Em relação aos resultados obtidos na presente pesquisa pode-se concluir que a cinza de lodo de ETE não é perigosa, porém é não inerte. A presença dos compostos químicos acima do que rege a NBR 10004/2004 devem ser consideradas e tomadas as medidas seguras de disposição do resíduo.

4.3. ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.3.1. Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, utilizando corpos de prova com 10cm de diâmetro e 20cm de altura na energia intermediária.

Na Figura 4.8 estão apresentadas as curvas de compactação dos materiais solo e pó de pedra, e na Tabela 4.17 estão apresentados os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca.

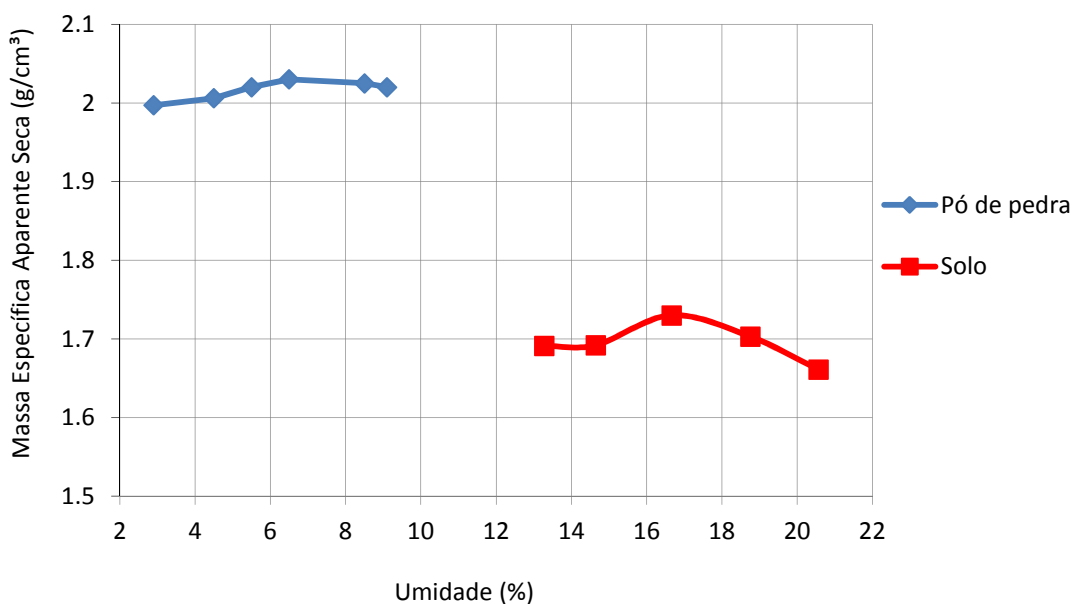


Figura 4.8: Curva de compactação do solo e pó de pedra deste estudo

Tabela 4.17: Resultados obtidos do ensaio de compactação dos materiais

Material/Mistura	Umidade ótima (%)	MEAS máxima (g/cm ³)
Solo	16,66	1,73
Pó de Pedra	6,5	2,03

Os resultados obtidos das curvas de compactação apresentaram valores compatíveis com os tipos de materiais estudados. A curva de compactação do solo apresenta o comportamento comum aos solos areno-siltosos, com valores baixos de massa específica aparente seca e com curva pouco abatida. Já a curva de compactação do pó de pedra, pouco definida, apresenta massa específica aparente seca elevada e umidade ótima baixa, típico de materiais granulares. Os valores da massa específica aparente seca da curva de compactação do pó de pedra variaram muito pouco em relação a umidade, devido a isso, a umidade ótima foi determinada através de processo tátil visual.

4.3.2. Ensaio de módulo de resiliência

Para o ensaio de módulo de resiliência foram moldados 3 corpos de prova para cada material na condição de umidade ótima e massa específica aparente seca

máxima, na energia intermediária de compactação, com o objetivo de avaliar a repetibilidade dos resultados.

Através do ensaio no equipamento triaxial dinâmico da COPPE/UFRJ foram obtidos os valores de Módulo Resiliência para diferentes pares de tensão confinante e tensão desviadora. Ao final do ensaio foram gerados gráficos em escala logarítmica que representam os resultados da relação entre o módulo de resiliência e as tensões aplicadas, para cada corpo de prova. Como os ensaios foram realizados em triplicata, com três corpos de prova, os resultados destes foram plotados em um único gráfico conforme mostrado nas Figuras 4.9 e 4.10.

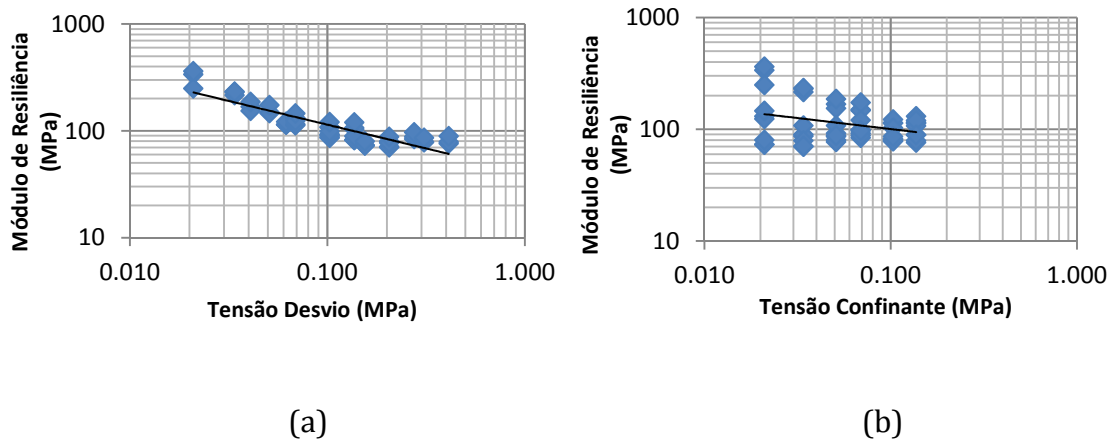


Figura 4.9: Módulo de resiliência do solo deste estudo em função da (a) tensão desvio, (b) tensão confinante – três corpos de prova

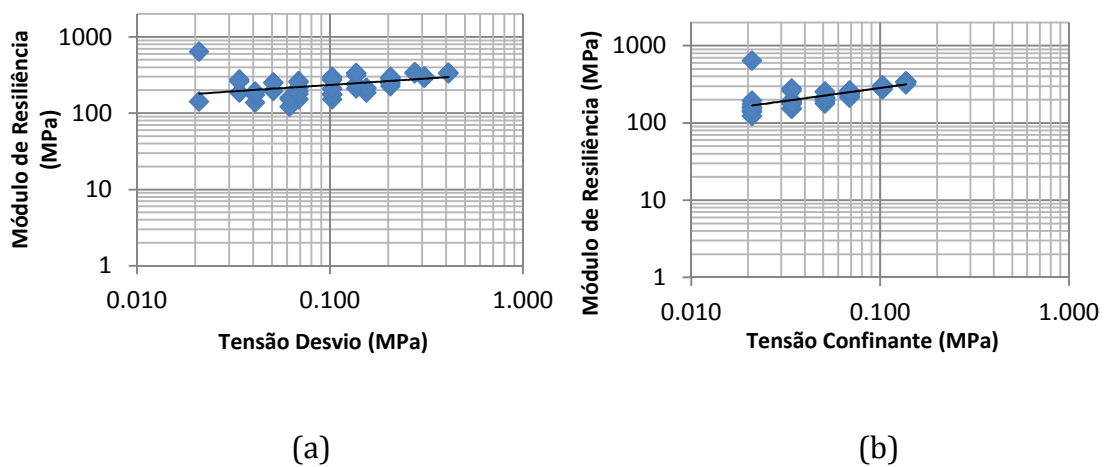


Figura 4.10: Módulo de resiliência do pó de pedra deste estudo em função da (a) tensão desvio, (b) tensão confinante – três corpos de prova.

O módulo de resiliência pode ser expresso como uma função do estado de tensões aplicado durante o ensaio por modelos matemáticos com constantes experimentais. Entre os modelos existentes, foram utilizados os que relacionam o módulo de resiliência com a tensão desvio, com a tensão de confinamento e também o modelo composto que relaciona o módulo de resiliência em função das tensões de confinamento e tensão desvio simultaneamente, conforme apresentado nas equações (4.1), (4.2) e (4.3) a seguir:

$$MR = k_1 * \sigma_d^{k_2} \quad (4.1)$$

$$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} \quad (4.2)$$

$$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3} \quad (4.3)$$

Onde:

MR= módulo de resiliência,

σ_3 = tensão confinante,

σ_d = tensão desvio,

k = parâmetros de modelagem que definem numericamente cada modelo

Os parâmetros k_1 e k_2 das equações 4.1 e 4.2 foram determinados com os resultados conjuntos dos três corpos de prova, utilizando o Excel.

Os parâmetros k_1 , k_2 e k_3 do modelo composto foram obtidos para cada corpo de prova utilizando o programa STATISTICA 8.0, e estão apresentados na Tabela 4.18 para o solo e na Tabela 4.19 para o pó de pedra.

Na Tabela 4.20 estão apresentados os parâmetros de regressão e os coeficientes de determinação de R^2 para os modelos clássicos, obtidos dos gráficos das Figuras 4.9 e 4.10. Na mesma tabela constam também a média aritmética dos parâmetros k_1 , k_2 e k_3 , dos ensaios em triplicata.

Tabela 4.18: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência para o solo deste estudo

Material	Protocolo COPPE	W ensaio (%)	MEAS máx (g/cm ³)	$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$ (MPa)			
				k1	k2	k3	R ²
Solo	591	16,08	1,73	35,41	0,226	-0,801	0,96
	592	16,32	1,71	44,45	0,216	-0,652	0,96
	593	16,46	1,72	28,59	0,207	-0,823	0,96

Tabela 4.19: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência para o pó de pedra deste estudo

Material	Protocolo COPPE	W ensaio (%)	MEAS máx (g/cm ³)	$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$ (MPa)			
				k1	k2	k3	R ²
Pó de pedra	594	6,06	2,00	881,5	0,495	0,012	0,98
	610	6,18	2,03	701,98	0,433	-0,081	0,94
	611	6,41	2,04	689,16	0,420	-0,065	0,94

Tabela 4.20: Resultado dos parâmetros de modelagem tensão – deformação médios para o solo e pó de pedra deste estudo – três corpos de prova

Material	$MR = k_1 * \sigma_d^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
	MPa			MPa			MPa			
	k1	k2	R ²	k1	k2	R ²	k1	k2	k3	R ²
Solo	40,95	-0,45	0,78	39,20	-0,368	0,35	35,66	0,22	-0,76	0,96
Pó de Pedra	344,89	0,17	0,17	615,23	0,335	0,47	757,55	0,45	0,009	0,94

Os resultados obtidos dos ensaios mostram que o solo em estudo, apresenta módulo de resiliência dependente da tensão desviadora, e que quanto maior a tensão desviadora, menor é o valor do módulo resiliente. Já o pó de pedra apresenta comportamento dependente da tensão confinante e quanto maior for a tensão confinante, maior é o valor do módulo resiliente.

Analisando os parâmetros dos diferentes modelos, observou-se que ambos os materiais apresentaram melhor comportamento em função da tensão desvio e da tensão confinante em conjunto, através do modelo composto, obtendo valores de R² superiores a 0,90, como já observado por muitos autores.

4.3.3. Deformação permanente

Os ensaios de deformação permanente foram realizados nas condições de umidade ótima dos materiais, ou muito próximas. Foi considerado para cada ensaio o grau de compactação que consiste na relação entre a massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio e a massa específica aparente seca máxima obtida da curva de compactação do material. Foi considerado válido para o ensaio os corpos de prova que apresentaram $98 < GC < 102$.

Nas Tabelas 4.21 e 4.22 estão apresentados os pares de tensões aplicados para cada ensaio, as condições de compactação (umidade, massa específica aparente seca máxima, grau de compactação) e também os resultados obtidos de deformação permanente inicial, a 10.000 ciclos e a 150.000 ciclos.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 estão representados os gráficos de deformação permanente dos materiais em função do número de ciclos (N). Notar que não foram feitos ensaios com os 9 pares propostos por Guimarães (2009) e só com 6. Isto foi decidido durante o decorrer dos ensaios porque nos níveis mais altos de tensão ensaiados já se obteve valores de deformação permanente total elevado pelos padrões propostos de escolha de materiais para pavimentação, conforme definido em Delgado *et al* (2013).

Pode parecer pouco uma deformação permanente total de 3,5 mm para 150.000 ciclos de carga ($1,5 \times 10^5$), por exemplo, mas é preciso lembrar que o afundamento de trilha de rodas máximo admissível por questões de segurança é em torno de 12 a 15mm, considerando a contribuição de todas as camadas e subleito.

Também a tendência ao não acomodamento dos dois materiais nestas tensões mais elevadas entre as ensaiadas leva a crer que em níveis maiores ainda de tensões poderiam tender à ruptura.

Tabela 4.21: Resultados de ensaio de deformação permanente para o solo estudado

Ensaio	Tensão (kPa)		Compactação			Def. permanente (mm)		
	σ_d	σ_3	w (%)	γ_d máx (g/cm ³)	GC	ϵ_p inicial	ϵ_p 10.000	ϵ_p 150.000
1	40	40	16,07	1,729	100	0,059	0,38	0,407
2	80		15,61	1,718	99	0,04	0,62	0,745
3	120		16,97	1,727	100	0,178	1,506	1,682
4	80	80	16,77	1,717	99	0,308	0,942	1,062
5	160		17,4	1,715	99	0,19	1,67	2,008
6	240		17,09	1,722	100	0,283	3,25	3,514

Tabela 4.22: Resultados de ensaio de deformação permanente do pó de pedra estudado

Ensaio	Tensão (kPa)		Compactação			Def. permanente (mm)		
	σ_d	σ_3	w (%)	γ_d máx (g/cm ³)	GC	ϵ_p inicial	ϵ_p 10.000	ϵ_p 150.000
1	40	40	6,63	2,038	100	-0,011	0,068	0,113
2	80		6,36	2,021	100	0,042	0,7	0,843
3	120		6,36	2,008	99	0,047	1,679	2,015
4	80	80	6,35	2,009	99	0,019	0,475	0,582
5	160		6,33	2,031	100	0,005	1,146	1,455
6	240		6,34	2,006	99	0	2,099	2,776

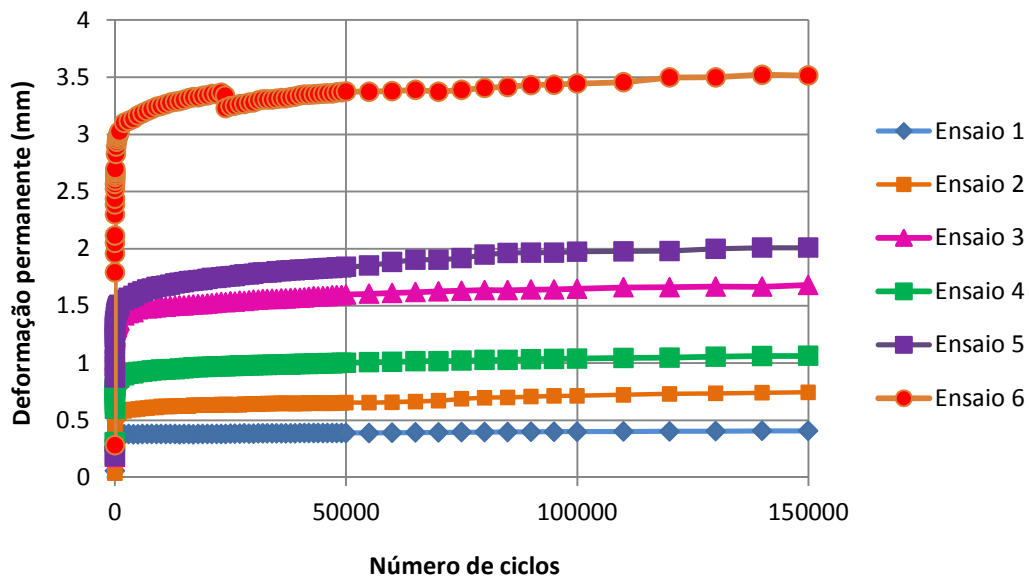


Figura 4.11: Resultado de deformação permanente do solo deste estudo

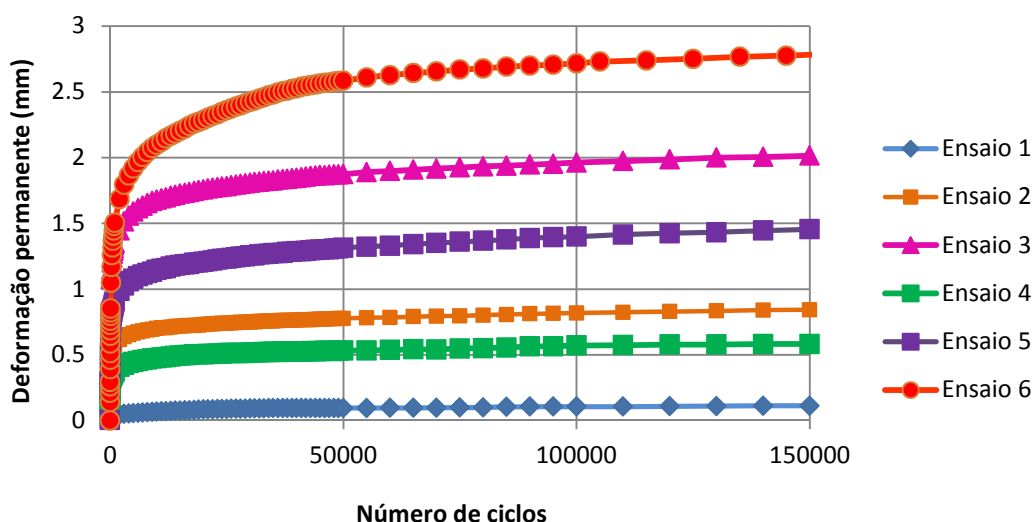


Figura 4.12: Resultado de deformação permanente do pó de pedra deste estudo

Observa-se que as formas das curvas apresentadas nas Figuras 4.11 e 4.12 são bastante semelhantes, com um rápido crescimento nos ciclos iniciais de aplicação de cargas seguidos de uma tendência de acomodamento da deformação permanente nos restantes dos ciclos. Nota-se, porém, que para o ensaio 6, tanto para o solo quanto para o pó de pedra, há ainda uma tendência de taxa de acréscimo relativamente acentuada da deformação permanente, em comparação aos demais ensaios.

Em todos os ensaios fica evidenciada a forte influência do estado de tensão, sendo que no caso do solo, Figura 4.11, o aumento da tensão desvio entre os ensaios 1 a 3, e 4 a 6 representou um aumento na deformação permanente total correspondente a um acréscimo de 313,26% e 230% respectivamente.

Para o pó de pedra, no ensaio 1 conduzido com um nível de tensão muito baixo ($\sigma_d = \sigma_3 = 40 \text{ kPa}$), a deformação permanente total observada foi de 0,113 mm em 150.000 ciclos de carga. Mantendo-se a tensão confinante, e aumentando a tensão desvio para 80 kPa e para 160 kPa, a deformação permanente foi aumentada para 0,843 mm e 2,015 mm, que corresponde a um aumento de 646% e 1683% respectivamente. O mesmo ocorreu para os ensaios 4, 5 e 6, na qual a deformação permanente da tensão σ_d igual a 240 kPa teve um aumento de 376% em relação a

σ_d igual a 80kPa, evidenciando a influência da tensão desvio na deformação permanente total.

Quanto à influência da tensão confinante, pode-se analisar esta através dos resultados obtidos dos ensaios 2 e 4, com mesma tensão desvio, σ_d igual a 80kPa e diferentes tensões confinantes σ_3 de 40kPa e 80kPa. Observa-se que o solo, no ensaio 4 realizado com maior nível de tensão confinante, σ_3 igual a 80kPa, apresentou maior deformação permanente total, cerca de 1,42 vezes superior aquela obtida no ensaio com σ_3 igual a 40kPa. Já os ensaios realizados com o pó de pedra, mostraram comportamentos diferentes, apresentando maior deformação permanente com a menor tensão confinante, σ_3 igual a 40kPa, cerca de 1,44 vezes superior a tensão confinante, σ_3 igual a 80kPa.

Segundo Guimarães (2009), sabe-se que nos solos granulares a deformação resiliente diminui com o aumento da tensão confinante, ou seja, o aumento da condição de confinamento do material aumenta sua resistência a deformação resiliente. Com relação à deformação permanente são poucas as referências sobre o assunto, mas pode-se constatar no presente estudo que com o aumento da tensão confinante foi possível diminuir a deformação permanente do material pó de pedra.

Para uma tensão confinante de 80kPa e tensão desvio de 240kPa (Ensaio 6), a deformação permanente total atingiu um valor de 3,51mm para o solo e 2,77mm para o pó de pedra, que pode ser considerado elevado para uma camada de pavimento constituída de 20cm de espessura. Considerando um valor admissível de 12,5mm para o afundamento total da trilha de roda, a contribuição percentual da camada de solo seria de 28% e para a camada de pó de pedra seria de 22%. Por este motivo o restante dos ensaios apresentados no Quadro 3.2 não foram realizados, e esse par de tensões foi adotado como crítico para o dimensionamento desta camada.

Pelos resultados de deformação apresentados pode-se concluir que a utilização do solo e do pó de pedra como camada de pavimento deve ser condicionada a uma situação de trabalho com baixas tensões, pois estados de

tensões muito altas poderão produzir significativas deformações permanentes nas camadas destes materiais quando compactados na energia intermediária.

4.4. EXPANSÃO

A importância do estudo da expansão das misturas contendo lodo de esgoto deve-se ao fato deste resíduo apresentar significativos teores de matéria orgânica em sua composição, sendo necessário garantir a estabilidade das misturas quando submetidas à presença de água.

Conforme descrito no Capítulo 3, foram utilizados dois procedimentos para determinação da expansão. O primeiro método adotado é padronizado pela Norma DNIT 160/2012, para determinação da expansibilidade de materiais passantes na peneira de 0,42mm (nº 40), absorvendo água por capilaridade através de placa porosa.

A norma não comenta em acrescentar água ao solo para sua compactação, apenas comenta que este deve estar seco em estufa a 60°C, em vista disso, o ensaio para o solo, lodo de esgoto e as misturas S95L5 e S85L15 foram realizadas a seco. Já as misturas contendo cal foram homogeneizadas na umidade ótima, pois para a cal reagir é necessário o uso da água. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.23.

Observa-se uma expansão de 44,30% do resíduo lodo de esgoto. Já era de se esperar que este material tivesse uma expansão elevada, devido aos altos valores de limite de liquidez e limite de plasticidade.

Nas misturas fica evidenciada a influência do lodo na expansão, pois quanto maior a porcentagem de lodo acrescentada maior é a expansão obtida. Já quando é acrescentada cal na mistura, a expansão tende a diminuir.

Tabela 4.23: Resultados de expansão dos materiais e misturas

Material/Mistura	Expansão (%)
Solo	12,3
Lodo	44,30
S95L5	14,66
S85L15	18,79
S80L15C5	16,8
S90L5C5	7,27
S80CL15C5	13,68

O solo estudado apresentou expansão de 12,3%, superior ao limite de expansão de 10% determinado de acordo com DNIT 139/2010 – ES, para uso em camada de sub-base, vendo-se a necessidade de estabilização deste material. Já a mistura composta por solo-lodo-cal (S90L5C5), apresentou expansão de 7,27%, inferior ao limite determinado pela norma, podendo ser utilizada como camada de sub-base segundo o critério de expansão.

Para o segundo método utilizado, padronizado pela Norma DNER-ME 049/94, as misturas foram compactadas na umidade ótima. Os corpos de prova depois de compactados foram embebidos em água durante 4 dias, e foram feitas leituras de expansão a cada 24 horas. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24: Resultados de expansão das misturas do experimento com estabilizantes

Material/Mistura	Expansão (%)
Solo	2,54
Solo-cal	0,42
S90L5C5	0,97
P91LN5Ci4	0,17
P91L5Ci4	0,39
S80CL15C5	0,93

Nota-se grande diminuição da expansão do solo quando adicionada a cal, cerca de 6 vezes. Porém quando é adicionado lodo nesta mistura, há um aumento na expansão, 0,97% para a mistura S90L5C5 e 0,93% para a mistura S80CL15C5.

Dentre as misturas estudadas, observa-se que as misturas compostas por pó de pedra tiveram os menores valores de expansão, P91LN5Ci4 obteve 0,17% e P91L5Ci4 obteve 0,39%. A mistura com lodo seco em grumos obteve maior expansão que a mistura composta por lodo in natura, pelo fato de que o lodo in natura possui uma grande porcentagem de água em sua composição e pouca quantidade de resíduo em si, já o lodo estando seco e em grumos não consegue reagir muito bem com a cal, elevando a sua expansão.

Cabe ressaltar também que os ensaios foram realizados sem tempo de cura, e que este poderia contribuir para uma diminuição da expansão gerada nas misturas.

4.5. EXPERIMENTO PILOTO

O experimento piloto consistiu na realização de ensaios de compactação e módulo de resiliência para as misturas com solo e com pó de pedra, utilizando o resíduo de lodo de esgoto nas proporções de 5%, 10% e 15%. Nesta fase da pesquisa, pôde-se avaliar o comportamento mecânico das misturas com o resíduo e também definir o teor a ser utilizado nas próximas etapas do trabalho.

4.5.1. Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados em molde cilíndrico com diâmetro de 10cm e altura de 20cm, de modo a aproveitar os corpos de prova para realizar ensaio de módulo de resiliência.

Conforme explicado no Capítulo 3, nesta fase da pesquisa, o lodo utilizado foi seco em estufa na temperatura de 60°C e passante na peneira ½" (12,7mm).

As misturas com solo e resíduo foram homogeneizadas, ensacadas e postas durante 24 horas em câmara úmida de forma a ter melhor homogeneidade da umidade. Já as misturas com pó de pedra, foram homogeneizadas e compactadas imediatamente.

Na Figura 4.13 estão apresentadas as curvas de compactação das misturas solo+resíduo e para comparação foi acrescentado no gráfico a curva de compactação do solo puro. Na Tabela 4.25 são apresentados os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima obtida para cada mistura.

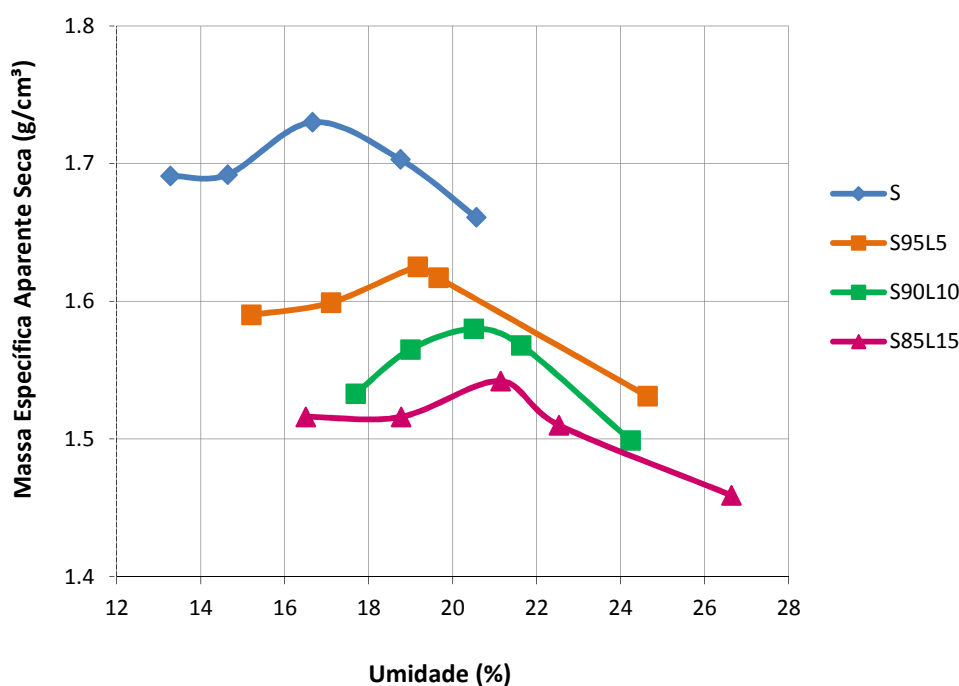


Figura 4.13: Curvas de compactação do solo e das misturas solo-lodo deste estudo

Tabela 4.25: Resultados obtidos das curvas de compactação do solo e das misturas solo-lodo deste estudo

Material/Mistura	Umidade ótima (%)	MEAS máxima (g/cm³)
Solo	16,66	1,730
S95L5	19,17	1,625
S90L10	20,5	1,580
S85L15	21,14	1,542

Analisando o gráfico da Figura 4.13, pode-se perceber que quanto maior o teor de resíduo incorporado na mistura, menor é a massa específica aparente seca e maior é a umidade ótima. Isto é esperado porque a densidade do lodo é muito menor que a do solo e absorve muito mais água o que também diminui a massa específica máxima.

Lucena (2012) observou o mesmo comportamento em seu trabalho, utilizando teores de 5%, 10%, 15% e 20% de lodo de ETE com solo areno siltoso. Segundo a autora, esta diminuição é esperada em virtude da amostra de lodo ter matéria orgânica em sua composição.

O mesmo ocorreu nas misturas utilizando pó de pedra, à medida que se acrescenta o resíduo na mistura, há uma diminuição da massa específica aparente seca e um aumento da umidade ótima. Na Figura 4.14 pode-se observar este comportamento e na Tabela 4.26 estão apresentados os valores obtidos de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima para cada combinação de materiais. Na Figura 4.14, pode-se perceber que na mistura P90L10, o valor da massa específica aparente seca não variou com a umidade e permaneceu praticamente constante, neste caso determinou-se a umidade ótima através de procedimento tátil-visual.

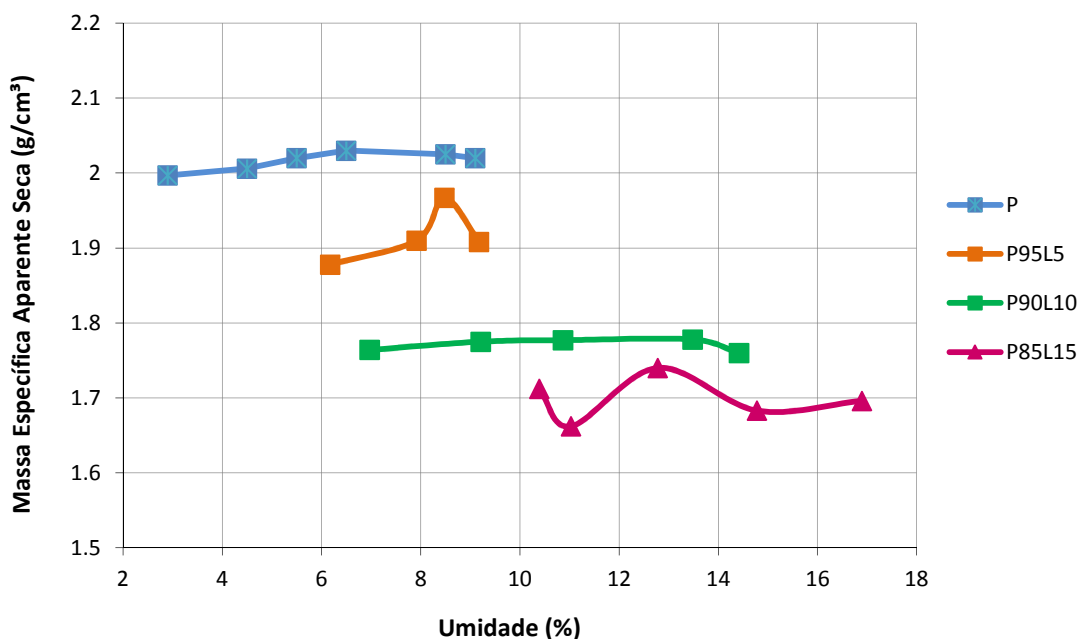


Figura. 4.14: Curvas de compactação do pó de pedra e misturas pó de pedra-lodo deste estudo

Tabela 4.26: Resultados obtidos das curvas de compactação do material e das misturas pó-lodo deste estudo

Material/Mistura	Umidade ótima (%)	MEAS máxima (g/cm ³)
Pó de Pedra	6,5	2,030
P95L5	8,28	1,967
P90L10	10,87	1,777
P85L15	12,78	1,740

4.5.2. Ensaio de Módulo de Resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência das misturas foram realizados na umidade ótima, aproveitando os corpos de prova da curva de compactação. Também para algumas das misturas foram realizados ensaios ao longo da curva, com o objetivo de avaliar a influência da umidade no módulo de resiliência.

Nas Tabelas 4.27 e 4.28 estão apresentados os parâmetros obtidos dos modelos estudados para as misturas. Dos resultados obtidos, pode-se perceber que as misturas de solo-lodo dependem mais da tensão desvio, e as misturas de pó de pedra-lodo dependem mais da tensão confinante. Porém quando analisado o

modelo composto, observa-se que ambas as misturas apresentaram melhor ajuste, com valores de R^2 superiores aos outros modelos.

Tabela 4.27: Resultado dos parâmetros de modelagem estudados para as misturas de lodo de ETE e solo deste estudo

Material	$MR = k_1 * \sigma_d^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
	MPa			MPa			MPa			
	k1	k2	R ²	k1	k2	R ²	k1	k2	k3	R ²
Solo	40,95	-0,445	0,78	39,20	-0,368	0,35	35,66	0,22	-0,76	0,96
S95L5	35,40	-0,38	0,80	35,86	-0,29	0,32	39,57	0,24	-0,62	0,96
S90L10	71,05	-0,103	0,25	91,58	0,001	0,001	108,34	0,32	-0,32	0,91
S85L15	49,23	-0,109	0,22	66,39	0,017	0,004	77,76	0,36	-0,36	0,89

Tabela 4.28: Resultados dos parâmetros de modelagem estudados para as misturas de lodo de ETE e pó de pedra

Material	$MR = k_1 * \sigma_d^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
	MPa			MPa			MPa			
	k1	k2	R ²	k1	k2	R ²	k1	k2	k3	R ²
Pó de pedra	344,89	0,17	0,17	615,23	0,34	0,47	757,55	0,45	0,009	0,94
P95L5	488,23	0,34	0,52	1154,30	0,57	0,97	1166,82	0,63	-0,07	0,99
P90L10	207,83	0,29	0,38	523,7	0,56	0,89	608,36	0,73	-0,15	0,98
P85L15	146,34	0,31	0,35	397,11	0,59	0,85	510,17	0,79	-0,13	0,97

Segundo Lucena (2012), os modelos clássicos e compostos que consideram apenas o estado de tensão podem não ser os mais indicados para representar misturas de solo com resíduos, onde as forças de atração química e mineralógica apresentam papel fundamental no comportamento das misturas.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 estão apresentadas as linhas de tendência geradas dos modelos clássicos que melhor se adequaram às misturas.

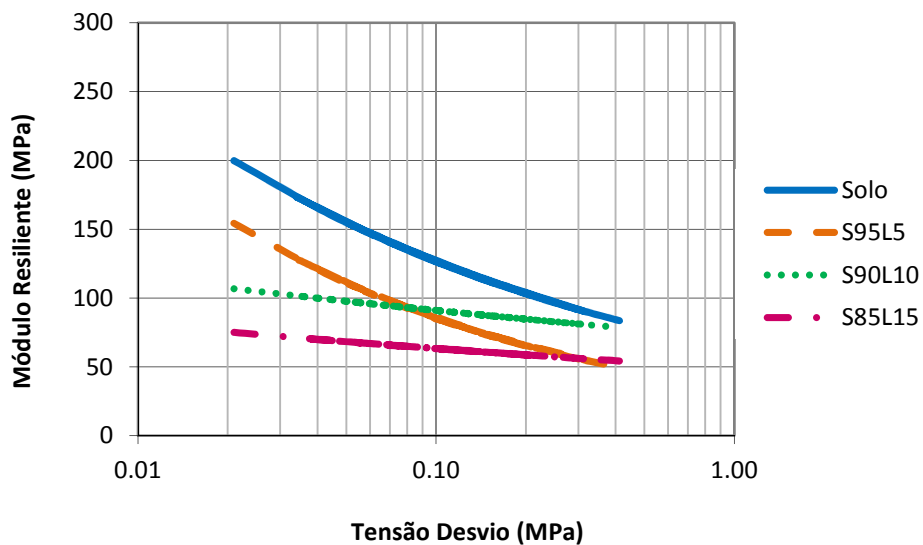


Figura 4.15: Linhas de tendência dos resultados dos ensaios de módulo de resiliência do solo e das misturas solo – lodo deste estudo

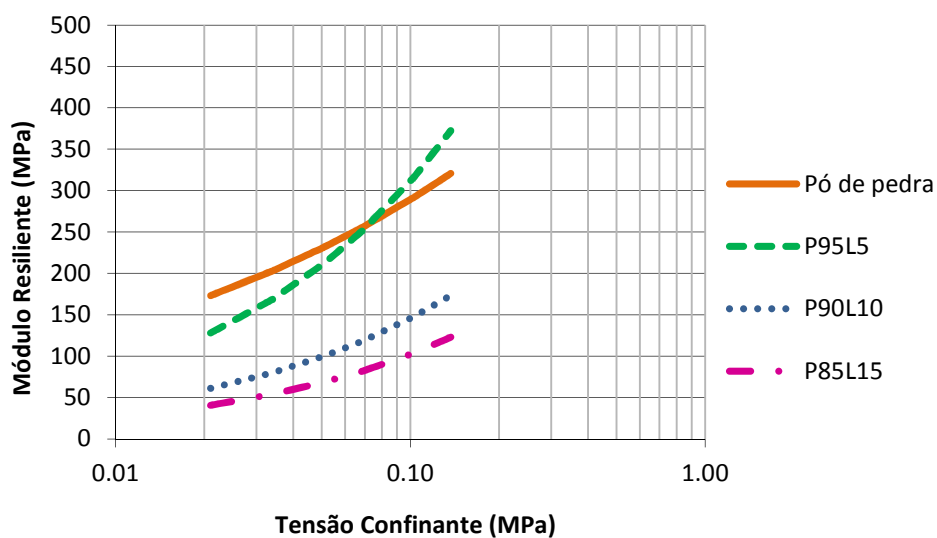


Figura 4.16: Linhas de tendência dos resultados do ensaio de módulo de resiliência do pó de pedra e das misturas pó-lodo deste estudo

Pela análise do gráfico da Figura 4.15, observa-se que quanto maior a adição de lodo acrescentada na mistura com o solo, menores são os valores de módulo de resiliência obtidos, ou seja, a adição do lodo de esgoto não trouxe nenhuma melhoria ao solo em termos de deformabilidade elástica.

O mesmo ocorreu para as misturas com pó de pedra, como pode ser observado na Figura 4.16, onde são apresentadas as linhas de tendências das misturas e do pó. Observa-se que a mistura P95L5 foi a que obteve melhor desempenho entre as demais, obtendo valor de módulo resiliente de 352MPa para tensão de confinamento (σ_3) igual a 0,137MPa, ligeiramente superior ao pó de pedra que obteve módulo resiliente de 333MPa nesta condição.

4.5.2.1. Influência da umidade no módulo de resiliência

Nas construções de rodovias, as condições de umidade e densidade observadas na compactação são geralmente próximas daquelas correspondentes ao pico da curva de compactação. Porém, às vezes esta condição não é obedecida e as compactações podem chegar a ser feitas no ramo seco ou no úmido. Visando avaliar a influência da umidade no módulo de resiliência, foram realizados para algumas misturas, ensaios de MR ao longo da curva de compactação. Por motivos operacionais, só foi possível realizar ensaio de MR ao longo da curva nas misturas S90L10, S85L15, P90L10 e P85L15.

Nas Figuras 4.17 e 4.18 estão apresentadas as linhas de tendência das misturas S90L10 e S85L15, em função da tensão desvio, e nas Figuras 4.19 e 4.20 estão apresentadas as linhas de tendência das misturas P90L10 e P85L15, em função da tensão confinante em três pontos da curva de compactação.

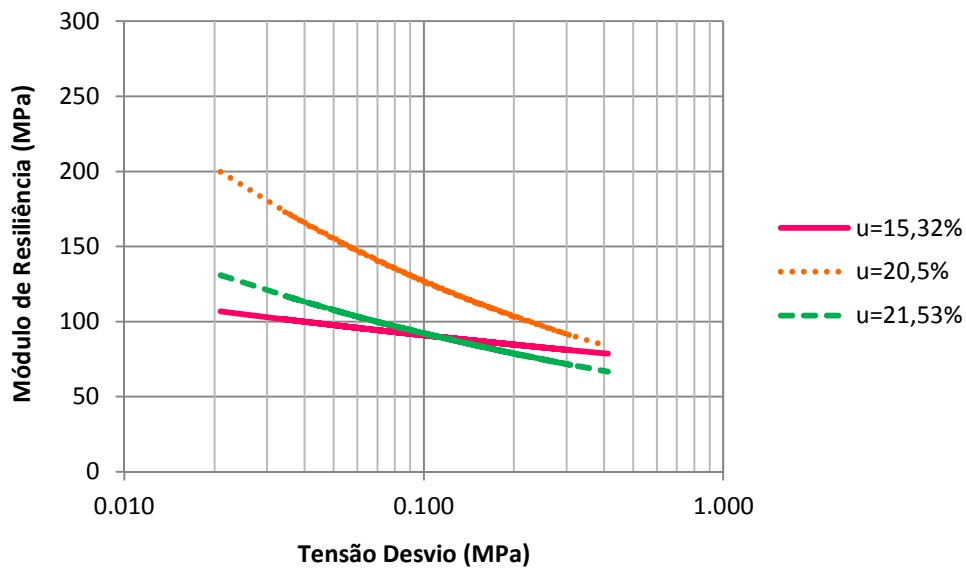


Figura 4.17: Linhas de tendência dos resultados do ensaio de módulo de resiliência da mistura S90L10 ao longo da curva de compactação

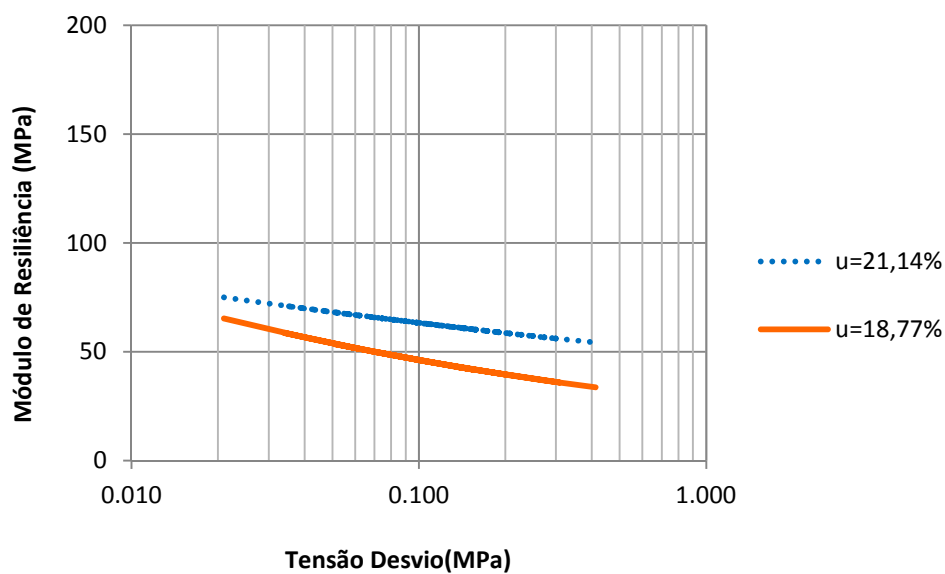


Figura 4.18: Linhas de tendência dos resultados do ensaio de módulo de resiliência da mistura S85L15 ao longo da curva de compactação

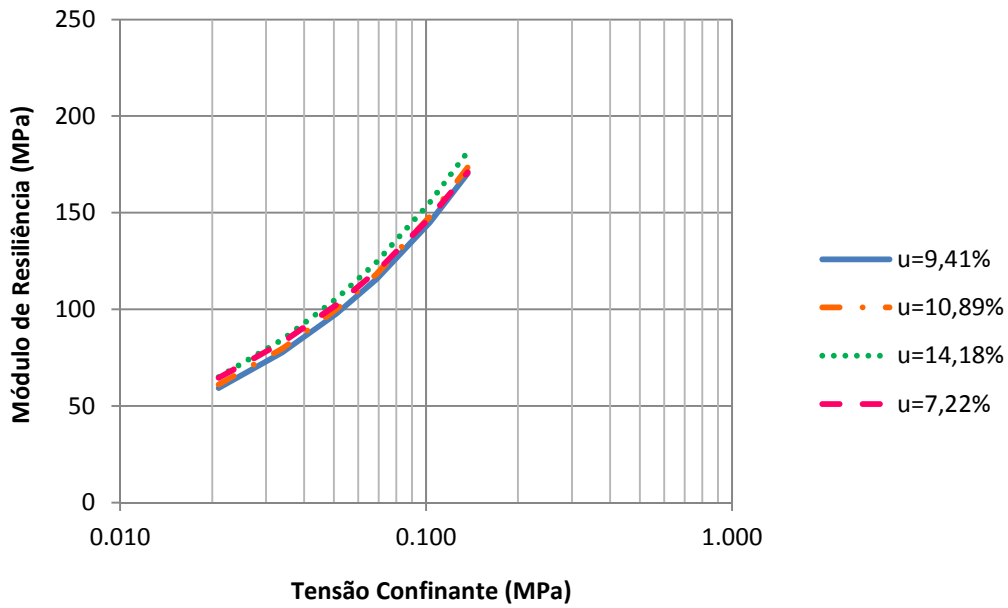


Figura 4.19: Linhas de tendência dos resultados do ensaio de módulo de resiliência da mistura P90L10 ao longo da curva de compactação

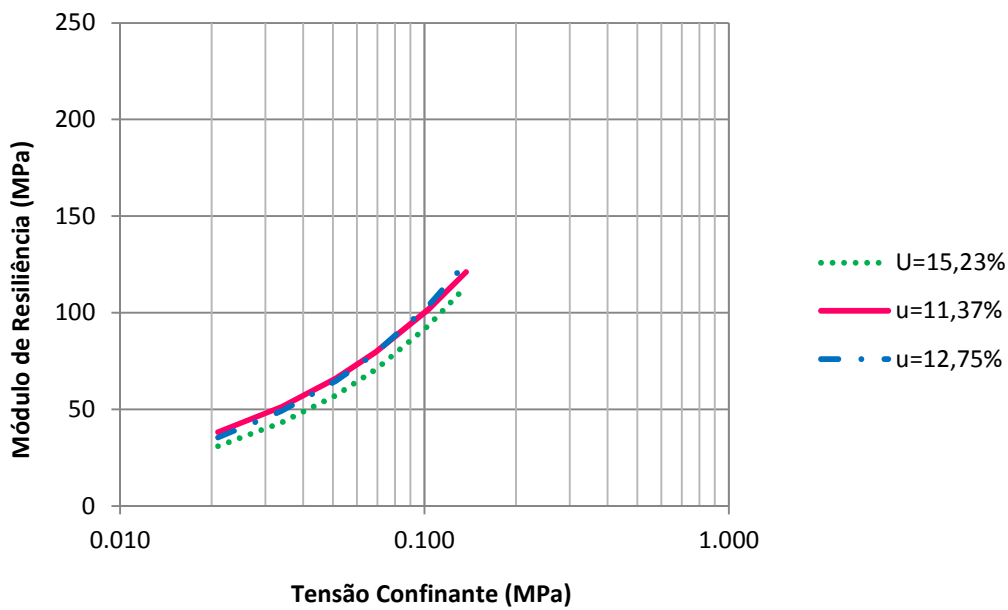


Figura 4.20: Linhas de tendência dos resultados do ensaio de módulo de resiliência da mistura P85L15 ao longo da curva de compactação

Na mistura S90L10 (Figura 4.17), pode-se observar a influência da umidade nos valores de módulo, na qual a mistura correspondente a umidade

ótima, (20,5%) apresentou maiores valores de MR do que nas misturas com umidade inferior e superior a esta. Na mistura S85L15 foram realizados ensaios na umidade ótima (21,14%) e umidade abaixo desta, os resultados apontaram que quando bem abaixo da umidade ótima os valores de módulo são inferiores. Com isso, pode-se dizer que as misturas de solo-lodo sofrem influência da água.

Já nas misturas com pó de pedra (Figura 4.19 e Figura 4.20), observou-se que os valores de módulo de resiliência não foram influenciados pela umidade, apresentando valores muito próximos, em condições bem distintas de compactação, o que é explicado pela própria indefinição das curvas de compactação destes materiais.

4.5 EXPERIMENTO COM ESTABILIZANTES

O experimento com estabilizantes consistiu em buscar algumas alternativas das misturas com lodo de ETE através do uso de estabilizantes. Foram escolhidos dois estabilizantes para compor as misturas: a cal para as misturas de solo-resíduo, e o cimento para as misturas de pó de pedra-resíduo. Além das misturas com lodo seco a 60°C, foram estudadas também misturas utilizando lodo in natura e lodo calcinado a 550°C.

A seguir serão detalhados os resultados obtidos para as misturas estudadas.

4.5.1 Misturas com lodo seco em estufa a 60°C

A partir dos resultados obtidos do experimento piloto, observou-se que quanto maior o teor de lodo acrescentado menor o valor obtido de módulo de resiliência da mistura. Porém, como o objetivo deste estudo é aproveitar o resíduo de lodo, optou-se primeiramente em utilizar a maior porcentagem de lodo, ou seja, 15% já que se vai fazer incorporação de estabilizante. No caso de não ser viável, tentar outros percentuais.

4.5.2.2. Dosagem da cal – Método de Eades e Grimm (1966)

Para a dosagem das misturas foi utilizado o Método de Eades e Grim (1966), conforme detalhado no item 3.2.4.7. Para o procedimento, foi utilizada a mistura com maior teor de lodo (15%) e teores de cal de 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12%. Segundo os autores, o menor teor de cal que proporcionar um valor de pH de 12,4 é o suficiente para estabilizar o solo.

A Figura 4.21 mostra o gráfico com os valores de pH obtidos para cada teor de cal. Os valores apontam um teor mínimo de 5% de cal para esta mistura.

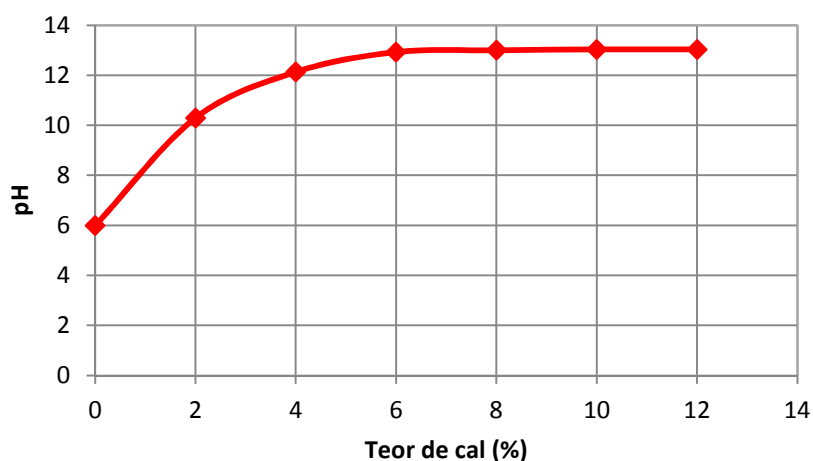


Figura 4.21: Resultados da dosagem do Método de Eades e Grim para mistura solo-lodo deste estudo

Utilizou-se primeiramente como teste um teor de cal inferior (3%) ao do determinado pelo método do pH, pensando que não necessariamente a intenção é estabilizar totalmente, mas poderia ser viável uma situação de solo melhorado com cal, pensando nos custos.

A mistura composta por 82% de solo, 15% de lodo e 3% de cal foi moldada, embalada e levada para cura em câmara úmida. Passados os 7 dias de cura, o corpo de prova foi retirado para fazer ensaio de módulo de resiliência. Porém, após retirar o corpo de prova da proteção de PVC observou-se que este se

encontrava totalmente trincado (Figura 4.22). O motivo principal destas trincas deve-se à expansão do lodo, e mostra que a percentagem de cal foi muito pequena para imobilizar essa expansão.



Figura 4.22: Trincas ocorridas durante a cura devido a expansão da mistura S82L15C3 deste estudo

Viu-se então a necessidade de aumentar o teor de cal, utilizando o valor de 5% conforme proposto pelo Método de Eades e Grim. Após a desmoldagem desta mistura com 5% de cal, observou-se também algumas fissuras, mas em menor proporção, o que leva a crer que mesmo com 5% de cal, não foi possível conter a expansão do lodo totalmente.

Quanto ao pó de pedra, foi feita uma tentativa utilizando 83% de pó de pedra, 15% de lodo e 2% de cimento com a mesma umidade ótima da mistura sem cimento. Aos 7 dias de cura do corpo de prova, observou-se que este também fissurou, não podendo ser realizado o ensaio de MR. Outro corpo de prova moldado nestas mesmas condições, foi deixado por um período de 28 dias de cura e observou-se após a sua retirada, muito mofo, conforme mostrado na Figura 4.23, ou seja, o cimento não conseguiu encapsular o lodo.

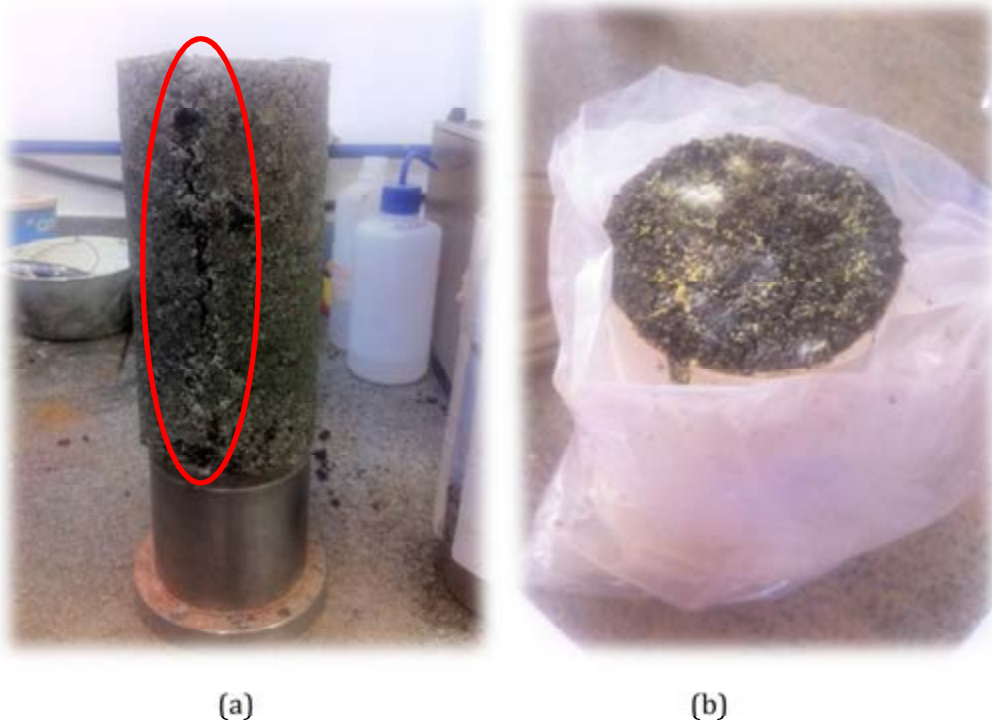


Figura 4.23: Corpos de prova de pó de pedra – lodo - cimento: (a) aos 7 dias com trinca e (b) aos 28 dias com mofo

Ao final destes primeiros testes e destas constatações, resolveu-se adotar as alternativas seguintes para o estudo:

- *Primeira alternativa:* utilizar menos resíduo na mistura;
- *Segunda alternativa:* utilizar menos resíduo na mistura e aumentar o teor de estabilizante;

Primeira alternativa:

Para as misturas com solo resolveu-se reduzir o teor de lodo e permanecer com o mesmo teor de cal, ou seja, utilizou-se um teor de 5% de lodo e 5% de cal. Definida a mistura, foram feitos ensaios de compactação. Após 7 dias de cura, percebeu-se novamente trincas no corpo de prova (Figura 4.24).



Figura 4.24: Mistura S90L5C5, tempo de cura de 7 dias

Buscou-se então destorroar o lodo seco a 60°C, pois foi feita a hipótese de que ele estando em grumos não estaria reagindo muito bem com a cal. Após a compactação desta mistura com o lodo destorroadado, não ocorreram mais fissuras e o corpo de prova pode ser ensaiado. No item 4.5.2.3, estão apresentados os resultados obtidos de compactação e módulo de resiliência desta mistura.

Segunda alternativa:

Para as misturas com pó de pedra diminuiu-se o teor de lodo e aumentou o teor de estabilizante. O teor de lodo utilizado foi de 5% e o teor de cimento foi de 4%. Não foram feitas curvas de compactação, os corpos de prova foram moldados com umidade ótima próxima da mistura P95L5. Para esta mistura o CP não apresentou fissuras, podendo ser realizado ensaio de módulo de resiliência. Estes resultados estão apresentados a seguir no item 4.5.2.4.

4.5.2.3. Ensaio de Compactação e Módulo de resiliência da mistura solo-lodo destorroado-cal

A curva de compactação da mistura S90L5C5, com lodo destorroado, está apresentada na Figura 4.25. Os resultados apontam umidade ótima de 19,30% e massa específica aparente seca máxima de 1,60g/cm³.

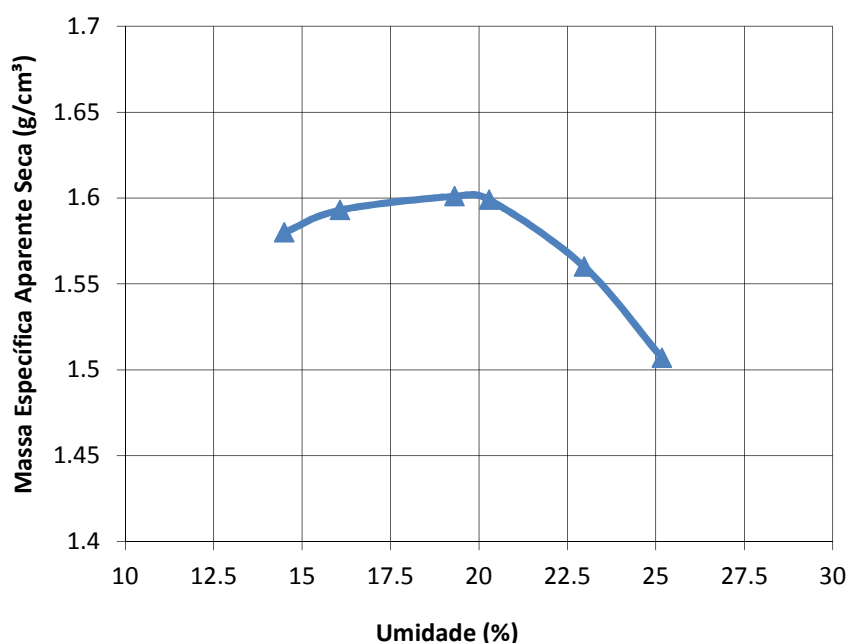


Figura 4.25: Resultados da curva de compactação da mistura S90L5C5 deste estudo

Verifica-se que os valores obtidos de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima foram praticamente iguais aos valores obtidos da mistura S95L5, ou seja, não houve influência nestes parâmetros ao adicionar a cal e destorroar o lodo.

Foram moldados três corpos de prova para esta mistura, na umidade ótima, ensaiados no equipamento triaxial da COPPE/UFRJ, dos quais foram obtidos os valores de Módulo de Resiliência (MR) para diferentes pares de tensão confinante (σ_3) e desviadora (σ_d).

Foram realizados ensaios de módulo de resiliência para a mistura S90L5C5 em tempos de cura de 7, 28 e 90 dias. Os três corpos de prova moldados foram ensaiados em todos os tempos de cura determinados, ou seja, o mesmo corpo de prova foi submetido ao Ensaio de Módulo de Resiliência três vezes. Esta opção foi escolhida, para diminuir a influência de outros fatores na análise, como por exemplo, os fatores envolvidos no processo de moldagem – umidade e massa específica aparente seca do corpo de prova. A cura foi realizada em câmara úmida no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da COPPE/UFRJ.

Na Tabela 4.29 estão apresentados os parâmetros k_1 , k_2 e k_3 do modelo composto, obtidos para cada corpo de prova utilizando o programa STATISTICA 8.0.

Os parâmetros k_1 e k_2 dos modelos clássicos foram determinados com os resultados dos conjuntos dos três corpos de prova, utilizando Excel, e estão apresentados na Tabela 4.30. Nesta mesma tabela constam também as médias aritméticas dos parâmetros do modelo composto da triplicata.

Na Figura 4.26 a título ilustrativo, são apresentadas as linhas de tendência em função da tensão confinante para a mistura estudada, nos diferentes tempos de cura. Percebe-se que os módulos aumentam com o tempo de cura, mas curiosamente a dependência das tensões também aumenta, o que não é o esperado para material estabilizado quimicamente.

Analisando a Figura 4.26, pode-se perceber que o módulo de resiliência apresentou significativo aumento em seus valores com a evolução da cura de 7 para 28 dias. Já os valores de MR para os tempos de cura de 28 e 90 dias foram muito semelhantes, o que possivelmente representa uma estagnação das reações químicas, ou seja, estas teriam se realizado por completo neste intervalo de tempo de cura. Verifica-se que a mistura com solo, lodo e cal apresentou comportamento característico dos materiais granulares, ou seja, o módulo de resiliência é dependente do confinamento aplicado ao corpo de prova, diferente do que acontece com o solo puro, mais dependente da tensão desvio. As reações da cal devem ter modificado a granulometria do solo formando grumos, mas não sendo

talvez suficiente para uma estabilização completa tendo em vista a presença do lodo.

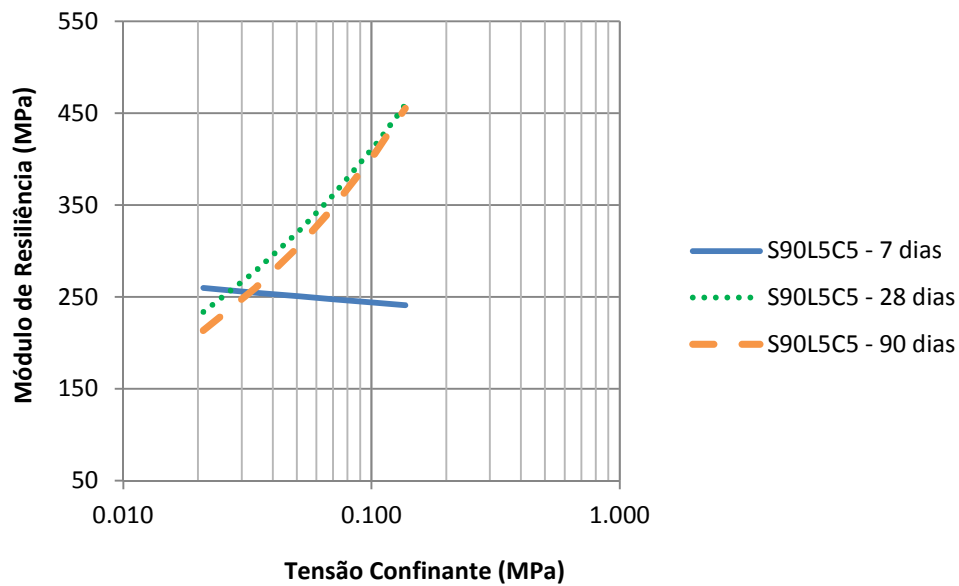


Figura 4.26: Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência para a mistura S90L5C5 aos 7, 28 e 90 dias de cura

Tabela 4.29: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência (MPa) da mistura S90L5C5 – (lodo seco e destorroado) deste estudo

Mistura S90L5C5	Protocolo COPPE	Wensaio (%)	MEAS máx (g/cm ³)	$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
				k1	k2	k3	R ²
7 dias	726	19,30	1,61	234,65	0,376	-0,536	0,92
	727	19,39	1,61	331,55	0,342	-0,264	0,95
	728	19,38	1,61	229,45	0,337	-0,485	0,93
28 dias	726	19,30	1,61	841,3	0,575	-0,152	0,92
	727	19,39	1,61	1375,21	0,55	-0,155	0,97
	728	19,38	1,61	894,55	0,476	-0,229	0,95
90 dias	726	19,30	1,61	661,99	0,487	-0,249	0,82
	727	19,39	1,61	1139,2	0,491	-0,178	0,89
	728	19,38	1,61	1682,16	0,61	0,023	0,99

Tabela 4.30: Resultado dos parâmetros de modelagem do MR para a mistura S90L5C5 deste estudo

Cura	$MR = k_1 * \sigma_d^{k_2}$ MPa			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2}$ MPa			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$ MPa			
	k1	k2	R ²	k1	k2	R ²	k1	k2	k3	R ²
7 dias	172,89	-0,16	0,31	222,41	-0,04	0,01	265,22	0,35	-0,43	0,93
28 dias	499,72	0,18	0,16	939,05	0,36	0,41	1037,02	0,533	-0,178	0,97
90 dias	468,7	0,16	0,12	1016,3	0,35	0,51	1161,1	0,529	-0,134	0,90

4.5.2.4. Ensaio de Módulo de Resiliência da mistura pó de pedra - lodo seco - cimento

Conforme já comentado, não foi refeita a curva de compactação para esta mistura tendo em vista a dificuldade de definir bem as curvas com o material pó de pedra e sabendo que em geral a presença do cimento não interfere muito nas condições de compactação. Foram feitos três corpos de prova submetidos aos ensaios com tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, visto que as reações do cimento são mais rápidas do que da cal. Nestas misturas o lodo seco a 60°C foi utilizado em grumos.

Na Tabela 4.31 estão apresentadas as médias aritméticas dos parâmetros obtidos do modelo composto para três corpos de prova, e também estão apresentados os parâmetros de regressão e os coeficientes de determinação R² para os modelos clássicos, que foram determinados com os resultados conjuntos da triplicata.

Tabela 4.31: Resultado dos parâmetros de modelagem do MR para a mistura P91L5Ci4 deste estudo

Cura	$MR = k_1 * \sigma_d^{k_2}$ MPa			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2}$ MPa			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$ MPa			
	k1	k2	R ²	k1	k2	R ²	k1	k2	k3	R ²
7 dias	528,64	0,328	0,29	1490,40	0,622	0,69	2378,68	0,82	-0,04	0,90
14 dias	731,50	0,430	0,47	2020,40	0,696	0,80	3055,09	0,802	0,066	0,96
28 dias	814,47	0,508	0,51	2653,40	0,815	0,86	3970,49	0,898	0,071	0,96

Na Tabela 4.32 estão apresentados os parâmetros k1, k2 e k3 do modelo composto, obtidos para cada corpo de prova, utilizando o programa STATISTICA 8.0.

Tabela 4.32: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência (MPa) da mistura P91L5Ci4 deste estudo

Mistura P91L5Ci4	Protocolo COPPE	W ótima (%)	MEAS máx (g/cm ³)	$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
				k1	k2	k3	R ²
7 dias	729	7,90	1,92	2481,66	0,805	-0,018	0,92
	730	7,50	1,92	1948,26	0,763	-0,06	0,85
	731	7,99	1,91	2706,14	0,886	-0,032	0,93
14 dias	729	7,90	1,92	3383,07	0,779	0,091	0,97
	730	7,50	1,92	2838,49	0,761	0,049	0,96
	731	7,99	1,91	2946,72	0,868	0,058	0,95
28 dias	729	7,90	1,92	5529,77	0,952	0,147	0,99
	730	7,50	1,92	2838,48	0,761	0,049	0,97
	731	7,99	1,91	2706,14	0,886	-0,032	0,94

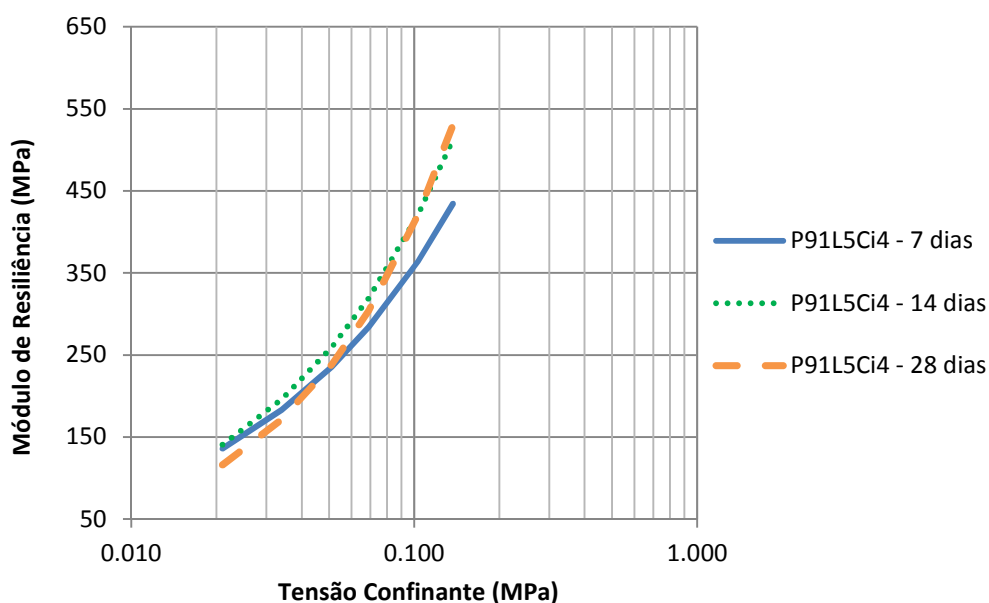


Figura 4.27: Resultados de Módulo de Resiliência para a mistura P91L5Ci4 aos 7, 14 e 28 dias de cura

Na mistura com pó de pedra, lodo e cimento, observou-se que o tempo de cura não teve muita influência no incremento do módulo de resiliência, apresentando valores muito próximos e muito dependentes ainda da tensão confinante. Da mesma forma que no solo, pode-se supor que a presença do lodo inibe parte das reações de cimentação esperadas.

4.5.3. Misturas com lodo in natura

Conforme relatado na metodologia da pesquisa, o lodo in natura foi utilizado nas misturas contendo pó de pedra e cimento. Foram adotados primeiramente dois testes com o resíduo. O primeiro teste foi realizado compactando um corpo de prova com 5% de lodo in natura, acrescentando água até um teor ótimo, que foi definido como 7,5%, e massa específica aparente seca máxima de 2,01g/cm³. O segundo teste, foi realizado com 15% de lodo in natura, pó de pedra e cimento, não foi acrescentado água, e a mistura apresentou 13,44% de umidade e massa específica aparente seca máxima de 1,85g/cm³.

Os dois corpos de prova após moldados foram embalados e levados à câmara úmida, onde permaneceram até os 7 dias de cura, e então realizado o ensaio de módulo de resiliência para avaliar o comportamento mecânico destas misturas. Foi observado um bom comportamento, os resultados apontaram valores superiores de MR da mistura com menos resíduo (5%) em relação a mistura com maior teor (15%).

A partir desta constatação, foram então compactados mais três corpos de prova com 5% de resíduo, nas mesmas condições do teste efetuado. Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência dessas misturas encontram-se no item 4.5.3.1 a seguir.

4.5.3.1. Ensaio de Módulo de Resiliência

Os resultados obtidos do Módulo de Resiliência dos testes realizados com lodo in natura, pó de pedra e cimento encontram-se nas Tabelas 4.33 e 4.34. Na Tabela 4.33 estão apresentados os parâmetros k1, k2 e k3 do modelo composto utilizando o programa STATISTICA 8.0 e na Tabela 4.34 estão apresentados os

parâmetros de regressão para os modelos clássicos. Não foi possível realizar ensaio de MR na mistura P91LN5Ci4 na idade de 28 dias, pois o corpo de prova quebrou na base inferior durante o transporte da câmara úmida para a prensa, ficando em desnível.

Analisando os parâmetros dos diferentes modelos, verificou-se que os coeficientes de correlação relativos ao modelo de tensão desvio são inexpressivos. De todos os modelos investigados, o que melhor representou o comportamento resiliente das duas misturas foi o modelo composto, como vem sendo ressaltado nos outros casos e por outros autores.

A Figura 4.28 apresenta, a título de exemplo ilustrativo, as linhas de tendência das misturas-testes, para suas respectivas idades de cura.

Tabela 4.33: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência (MPa) para as misturas testes P81LN15Ci4 e P91LN5Ci4

Mistura Teste	Protocolo COPPE	Wótima (%)	MEAS máx (g/cm ³)	$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
				k1	k2	k3	R ²
P81LN15Ci4 - 7 dias	721	13,44	1,85	871,46	0,58	-0,278	0,88
P81LN15Ci4 - 28 dias				915,72	0,539	-0,233	0,84
P91LN5Ci4 - 7 dias	722	7,5	2,01	3970,37	0,587	-0,022	0,98
P91LN5Ci4 - 19 dias				4786,02	0,689	-0,029	0,99

Tabela 4.34: Resultados dos parâmetros k1 e k2 obtidos pela regressão linear nos modelos tradicionais de MR

Mistura Teste	$MR = k_1 * \sigma_d^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2}$		
	MPa			MPa		
	k1	k2	R ²	k1	k2	R ²
P81LN15Ci4 7 dias	352,28	0,089	0,06	699,72	0,310	0,49
P91LN15Ci4 28 dias	406,84	0,096	0,07	775,94	0,302	0,48
P91LNCi4 - 7 dias	1931,9	0,407	0,62	4540,4	0,621	0,96
P91LNCi4 - 19 dias	1805,5	0,410	0,59	4624,1	0,653	0,98

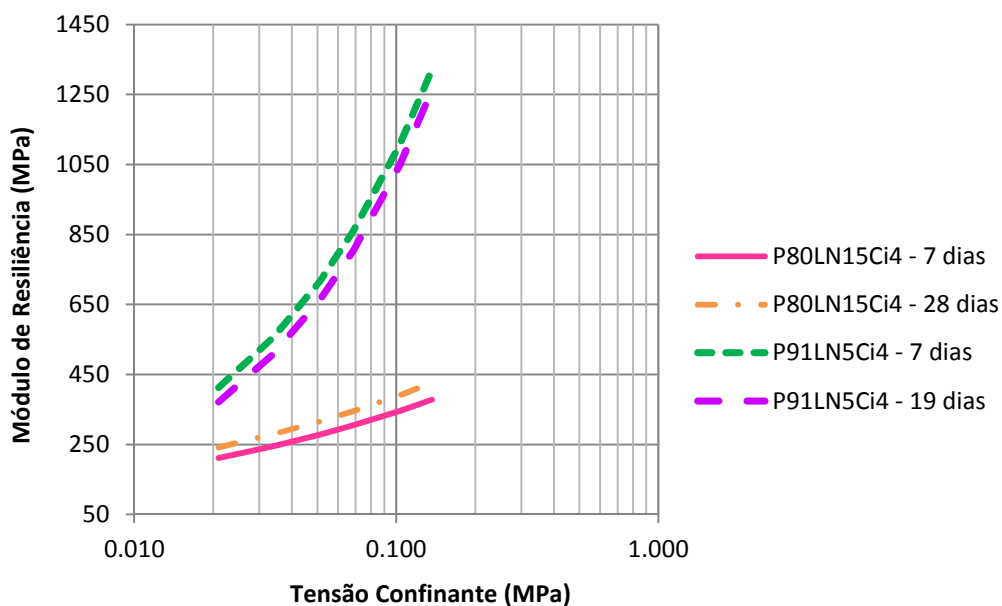


Figura 4.28: Resultados dos ensaios de módulo de resiliência das misturas-testes P91LN5Ci4 e P81LN15Ci4

Observa-se na Figura 4.28, a influência do teor de lodo acrescentado na mistura. Os valores de módulo de resiliência da mistura com 5% de resíduo foram superiores aos valores da mistura com 15%. Considerando a idade de cura de 7 dias e a menor tensão confinante de 0,021MPa, nota-se um aumento de 95% quando se reduz a quantidade de resíduo. Para a maior tensão confinante de 0,137MPa, o aumento gerado é de cerca de 249%.

Na mistura P91LN5Ci4 nota-se um grande aumento do módulo de resiliência em relação à tensão confinante. Da menor tensão confinante para a maior tensão confinante houve um aumento de cerca de 220%, já na mistura P81LN15Ci4 o aumento foi menor, cerca de 79%.

Quanto ao tempo de cura das misturas, observou-se pouca variação do módulo de resiliência. Ressalta-se que a mistura P91LN5Ci4 poderia ter ainda um acréscimo no MR se fosse realizado em um tempo de cura maior de 28 dias, que não foi possível pela quebra do CP.

A partir dos resultados das misturas testes, escolheu-se a mistura P91LN5Ci4 como a mistura definitiva. Foram então moldados três corpos de prova

nas mesmas condições da mistura teste. Os corpos de prova foram ensaiados nos tempo de cura de 7, 17 e 28 dias. As regressões obtidas dos ensaios estão apresentadas nas Tabelas 4.35 e 4.36.

Na Tabela 4.35, os parâmetros k1, k2 e k3 foram obtidos para cada corpo de prova utilizando o programa STATISTICA 8.0.

Os parâmetros k1 e k2 dos modelos clássicos apresentados nas equações 4.1 e 4.2, foram determinados com os resultados conjuntos dos três corpos de prova, utilizando Excel, e estão apresentados na Tabela 4.36. Nesta mesma tabela consta também, a média aritmética dos parâmetros do modelo composto da triplicata.

Diferente da mistura P91L5Ci4 com lodo seco a 60°C em grumos, observou-se que na mistura com lodo in natura, os resultados de módulo de resiliência apresentaram aumento em seus valores com a evolução do tempo de cura. Para a menor tensão de confinamento ($\sigma_3=0,021\text{MPa}$), observou-se um aumento de 18% e para a maior tensão de confinamento ($\sigma_3=0,137\text{MPa}$), o aumento foi de 68%, dos 7 aos 28 dias de cura.

Tabela 4.35: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência (MPa) para a mistura P91LN5Ci4

Mistura	Protocolo	Wótima (%)	MEAS máx (g/cm ³)	$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$											
				k1	k2	k3	R ²								
P91LN5Ci4	COPPE	7,52	1,99	2487,68	0,492	-0,034	0,98								
								7 dias	724	7,89	1,97	3029,08	0,724	0,119	0,98
									725	7,53	1,98	2311,54	0,457	-0,075	0,98
17 dias	723	7,52	1,99	3633,23	0,558	0,067	0,94								
								724	7,89	1,97	3785,05	0,655	0,135	0,99	
															725
28 dias	723	7,52	1,99	5515,12	0,694	0,06	0,99								
								724	7,89	1,97	4798,64	0,616	0,038	0,99	
															725

Tabela 4.36: Resultado dos parâmetros de modelagem do MR para a mistura P91LN5Ci4 deste estudo

Cura	$MR = k_1 * \sigma_d^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
	MPa			MPa			MPa			
	k1	k2	R ²	k1	k2	R ²	k1	k2	k3	R ²
7 dias	1094,3	0,324	0,21	2372,3	0,527	0,38	2613,09	0,557	0,003	0,97
17 dias	1362,8	0,423	0,51	3390,9	0,654	0,80	3836,83	0,626	0,094	0,97
28 dias	2244	0,494	0,66	5821,9	0,724	0,93	5118,18	0,639	0,045	0,98

Na Figura 4.29 estão apresentadas as linhas de tendência da mistura nos diferentes tempos de cura. Nota-se também uma grande evolução dos valores de MR associada ao aumento da tensão confinante. Da menor tensão confinante ($\sigma_3=0,021$) para a maior tensão confinante ($\sigma_3=0,137$) o aumento foi de cerca de 170% para os 7 dias de cura, 239% de aumento aos 17 dias de cura e 285% aos 28 dias de cura. Continua o comportamento granular do material composto de pó-lodo in natura-cimento, mostrando que a atuação do cimento é efetiva na melhoria do comportamento da mistura, mas não cria uma estabilização plena. Porém esta melhoria parcial das condições de trabalhabilidade e deformabilidade podem ser suficientes para o emprego como camada de pavimento.

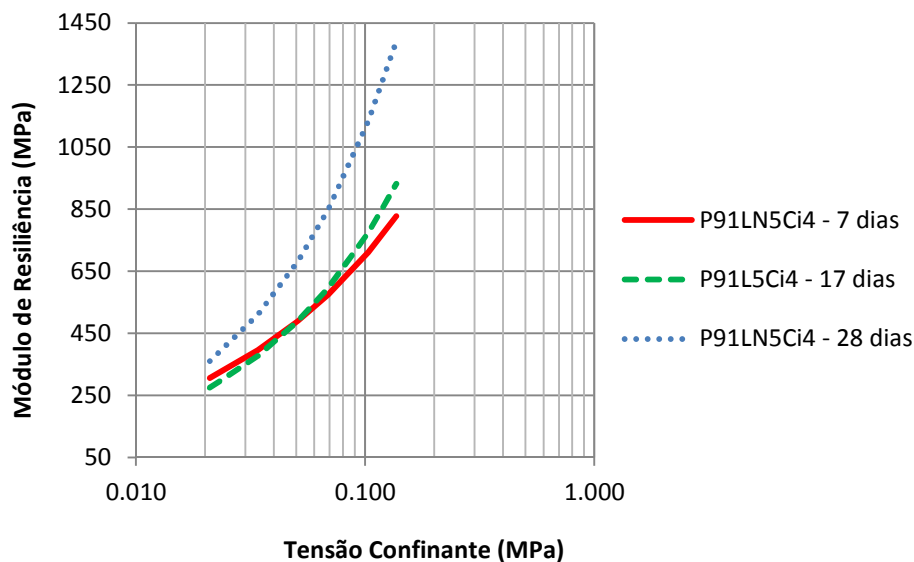


Figura 4.29: Resultados de Módulo de Resiliência da mistura P91LNCi4 aos 7, 17 e 28 dias de cura

4.5.4. Misturas com cinza de lodo de ETE

As misturas com cinza de lodo de esgoto foram realizadas com um teor maior de resíduo (15%). Realizou-se também uma mistura de solo-cal, sem a cinza, para analisar a influência da cinza no comportamento mecânico.

4.5.4.1. Ensaio de compactação

Na Figura 4.30 estão apresentadas as curvas de compactação das misturas S95C5 e S80CL15C5, e também a curva de compactação do solo para comparação. Na Tabela 4.37, são dados os valores obtidos de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

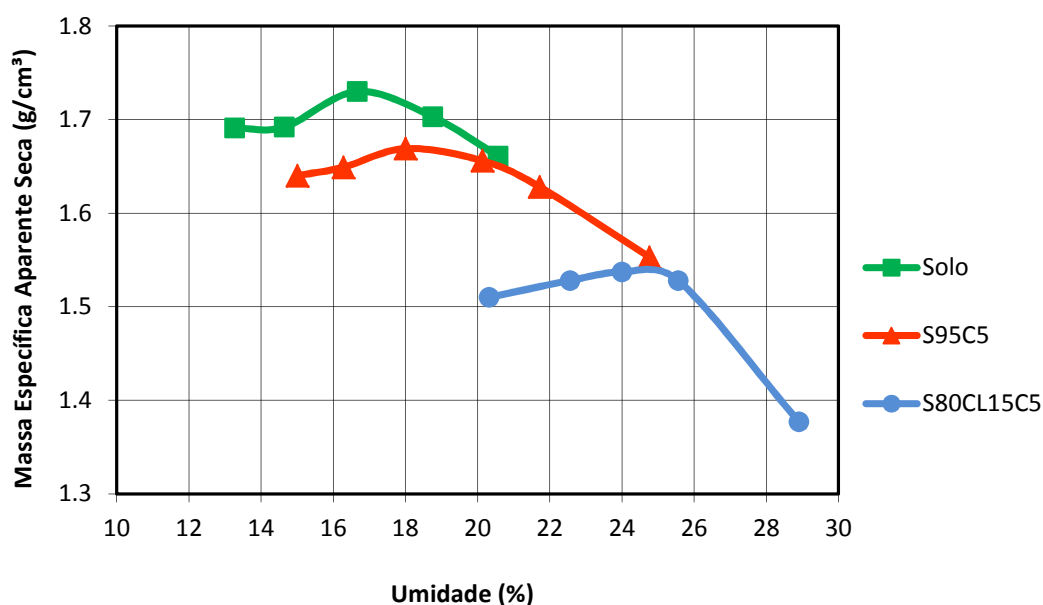


Figura 4.30: Curvas de compactação das misturas S95C5 e S80CL15C5 deste estudo

Tabela 4.37: Resultados das curvas de compactação das misturas S95L5 e S80CL15C5

Material/Mistura	Umidade ótima (%)	MEAS máxima (g/cm³)
Solo	16,66	1,73
S95L5	18	1,67
S80CL15C5	24	1,54

Pelos resultados das curvas de compactação, nota-se que, com o acréscimo da cal ao solo, a umidade ótima aumenta e a massa específica aparente seca máxima diminui. Segundo Silvapullaiah *et al* (1998) *apud* Lovato (2004) este comportamento ocorre devido a flocculação, na qual a quantidade e o tamanho de vazios no solo aumenta. De acordo com os autores, a estrutura flocculada é forte o suficiente para resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios mais alto, reduzindo assim a massa específica aparente seca do solo. Quanto mais vazios houver, mais água será necessária para preenchê-los, o que resultará em uma umidade ótima maior.

Quando adicionada a cinza de lodo de ETE, observa-se também um aumento na umidade ótima e uma diminuição na massa específica aparente seca máxima. Este comportamento também foi encontrado em alguns trabalhos, como em Dourado (2013) que estudou misturas de solo com cinza de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) e também no trabalho de Lopes (2011) que estudou misturas de solo com cinza de carvão mineral.

4.5.4.2. Ensaio de Módulo de Resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados em triplicata, os três corpos de prova foram moldados na umidade ótima, e ensaiados nas idades de cura de 7, 28 e 90 dias.

Os resultados obtidos com a aplicação do modelo composto foram gerados pelo Programa Computacional STATISTICA 8.0. Os resultados obtidos para cada corpo de prova encontram-se expostos na Tabela 4.38 para a mistura com cinza de lodo de ETE S80CL15C5 e na Tabela 4.40 para a mistura solo-cal.

Nas Tabelas 4.39 e 4.41 estão apresentadas as médias aritméticas dos parâmetros obtidos do modelo composto da triplicata, e também estão apresentados os parâmetros de regressão e os coeficientes de determinação R^2 para os modelos clássicos, que foram determinados com os resultados conjuntos dos três corpos de prova para os tempos de cura de 7 e 28 dias. Para o tempo de cura de 90 dias as regressões foram realizadas apenas com um corpo de prova.

Assim como nas outras misturas estudadas, verifica-se através dos dados de R^2 dos modelos clássicos, um melhor enquadramento no modelo de variação do módulo resiliente em relação a tensão confinante do que em relação a tensão desvio para os tempos de cura de 7 e 28 dias.

Aos 90 dias de cura, observa-se que o comportamento da mistura com cinza muda de dependente da tensão confinante para dependente da tensão desvio, já a mistura solo-cal apresenta ainda comportamento dependente da tensão confinante.

Para ambas as misturas, o modelo composto obteve melhor enquadramento, com valores de R^2 superiores a 0,80.

Tabela 4.38: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência (MPa) para a mistura S80CL15C5

Mistura S80CL15C5	Protocolo COPPE	Wótima (%)	MEAS máx (g/cm ³)	$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
				k1	k2	k3	R ²
7 dias	742	24	1,54	589,36	0,328	-0,242	0,88
	745	23,32	1,53	628,51	0,361	-0,22	0,87
	746	23,29	1,53	913,1	0,472	-0,169	0,96
28 dias	742	24	1,54	1066,68	0,482	-0,091	0,96
	745	23,32	1,53	702,39	0,417	-0,202	0,87
	746	23,29	1,53	1142,89	0,482	-0,144	0,88
90 dias	746	23,29	1,53	493,35	0,193	-0,351	0,81

Tabela 4.39: Resultado dos parâmetros de modelagem do MR para a mistura S80CL15C5 deste estudo

Cura	$MR = k_1 * \sigma_d^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
	MPa			MPa			MPa			
	k1	k2	R ²	k1	k2	R ²	k1	k2	k3	R ²
7 dias	421,22	0,058	0,05	648,34	0,195	0,42	710,32	0,387	-0,21	0,90
28 dias	499,09	0,156	0,20	915,58	0,335	0,62	970,65	0,46	-0,146	0,90
90 dias	435,9	-0,162	0,45	484,1	-0,091	0,10	493,35	0,193	-0,351	0,81

Tabela 4.40: Parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência (MPa) da mistura solo-cal

Mistura S95C5	Protocolo COPPE	Wensaio (%)	MEAS máx (g/cm ³)	$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
				k1	k2	k3	R ²
7 dias	750	18,37	1,66	565,69	0,206	-0,315	0,97
	751	18,47	1,67	615,15	0,405	-0,18	0,96
	752	19,00	1,65	674,03	0,454	-0,173	0,97
28 dias	750	18,37	1,66	3405,95	0,559	0,001	0,99
	751	18,47	1,67	2151,32	0,537	-0,037	0,96
	752	19,00	1,65	2083,83	0,473	0,03	0,99
90 dias	750	18,37	1,66	3410,98	0,478	0,172	0,95

Tabela 4.41: Resultado dos parâmetros de modelagem do MR para a mistura solo-cal deste estudo

Cura	$MR = k_1 * \sigma_d^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2}$			$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
	MPa			MPa			MPa			
	k1	k2	R ²	k1	k2	R ²	k1	k2	k3	R ²
7 dias	435,53	0,13	0,10	745,02	0,29	0,35	618,29	0,355	-0,222	0,96
28 dias	1181,50	0,33	0,50	2459,30	0,52	0,80	2547,03	0,523	-0,002	0,98
90 dias	1466,6	0,396	0,66	2785,2	0,538	0,80	3410,98	0,478	0,172	0,95

Nas Figuras 4.31 e 4.32 estão apresentadas as linhas de tendência dos ensaios para seus respectivos tempos de cura. Nota-se na Figura 4.31 para a mistura S80CL15C5 que os valores obtidos de módulo de resiliência foram próximos, para a tensão confinante de 0,137MPa aos 7 dias de cura o módulo resiliente foi de 440MPa e para a idade de cura de 28 dias foi de 470MPa.

Aos 90 dias de cura, a mistura obteve comportamento dependente da tensão desvio, conforme relatado anteriormente. Apesar de apresentar baixo valor de R² no modelo em função da tensão confinante, a linha de tendência foi incluída no gráfico da Figura 4.31, para fins de comparação. Observa-se neste tempo de cura, que os valores de módulo de resiliência diminuem com o aumento da tensão confinante, e apresentam valores de módulo superiores aos tempos de cura de 7 e 28 dias.

Na mistura S95C5, o tempo de cura influenciou nos valores de módulo de resiliência. Para a menor tensão confinante de 0,021MPa, o aumento do módulo resiliente dos 7 aos 28 dias foi de 36%, para a tensão confinante maior de 0,137MPa, o aumento do módulo resiliente dos 7 aos 28 dias foi de 108%. Aos 90 dias de cura, observou-se pequeno aumento nos valores de módulo de resiliência em relação aos 28 dias de cura. Para a menor tensão confinante de 0,021MPa, o aumento foi de apenas 6% e para a maior tensão de 0,137MPa, o aumento foi de 9%.

O fato a ser notado é que a mistura de solo-cal continua a apresentar comportamento dependente da tensão, mostrando que para este solo, o teor de cal foi mais efetivo na mudança de comportamento de “dependente” da tensão desvio encontrado no solo puro, para dependente da tensão confinante no solo-cal. Isto se dá pela mudança granulométrica que a cal promove.

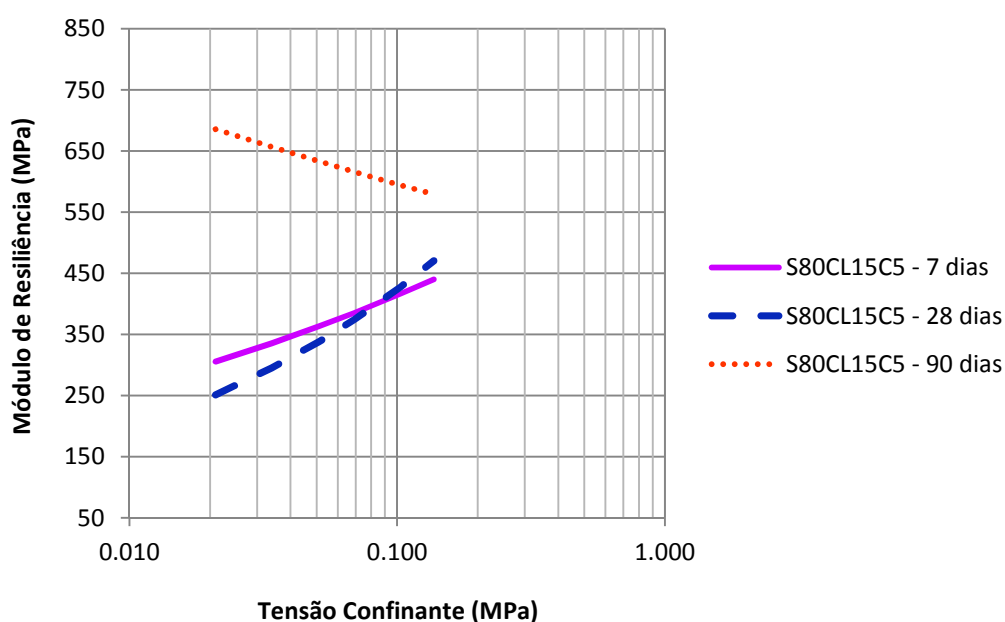


Figura 4.31: Resultados de Módulo de Resiliência da mistura S80CL15C5 para idades de cura de 7, 28 e 90 dias

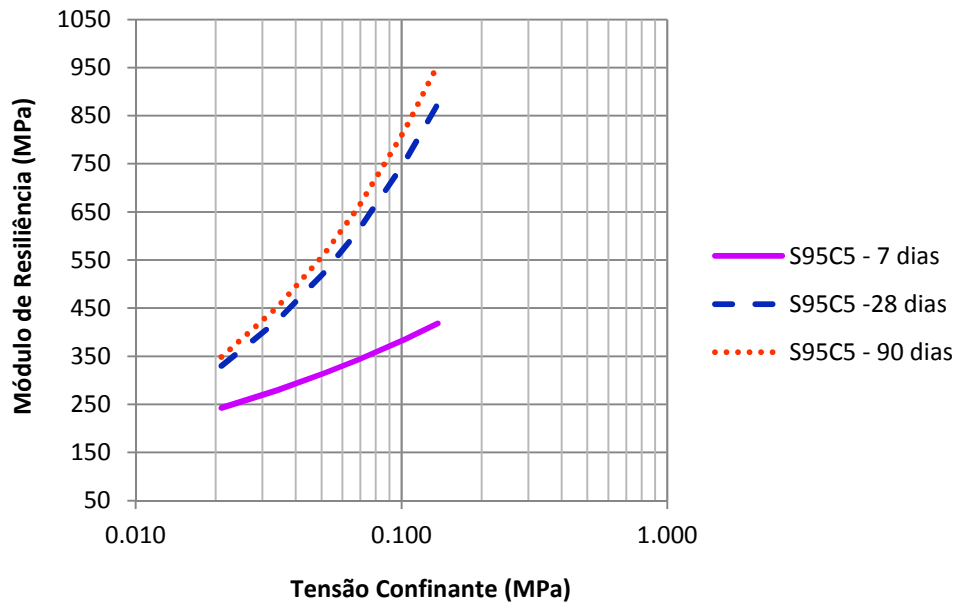


Figura 4.32: Resultados de Módulo de Resiliência da mistura S95C5 para idades de cura de 7, 28 e 90 dias

Vale comentar que os gráficos apresentados neste item para comparar os diferentes valores de módulo de resiliência foram plotados em função da tensão desvio ou da tensão confinante, individualmente e não pelo modelo composto somente por facilidade de representação no plano x-y. Sabe-se que a melhor representação dos resultados é a expressão pelo módulo composto e esta foi a utilizada nas análises numéricas.

4.5.5. Ensaio de deformação permanente das misturas

Os ensaios de deformação permanente foram realizados somente com duas das misturas estudadas: S80CL15C5 e P91LN5Ci4. Buscou-se compactar os corpos de prova nas condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, porém a mistura P91LN5Ci4 apresentou umidade acima da ótima, mas mesmo assim foi considerada na análise.

Os ensaios foram realizados com tensão confinante $\sigma_3=80\text{kPa}$ e tensão desviadora $\sigma_d=240\text{kPa}$, com tempo de cura das misturas de 28 dias.

Na Tabela 4.42 estão apresentados os resultados de deformação permanente das misturas e também os resultados de deformação permanente dos materiais puros para comparação, e na Figura 4.33 estão apresentadas as curvas obtidas para estas condições de ensaio dos materiais e das misturas.

Tabela 4.42: Resultados de deformação permanente das misturas

Material ou Mistura	Tensão (kPa)		Compactação			Def. permanente (mm)		
	σ_d	σ_3	w (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	GC	ϵ_p inicial	ϵ_p 10.000	ϵ_p 150.000
Solo	240	80	17,1	1,722	100	0,282	3,25	3,52
Pó de pedra			6,34	2,00	99	0,00	2,09	2,77
S80CL15C5			24,00	1,53	99	0,036	0,197	0,244
P91LN5Ci4			8,65	1,99	99	0,044	0,306	0,354

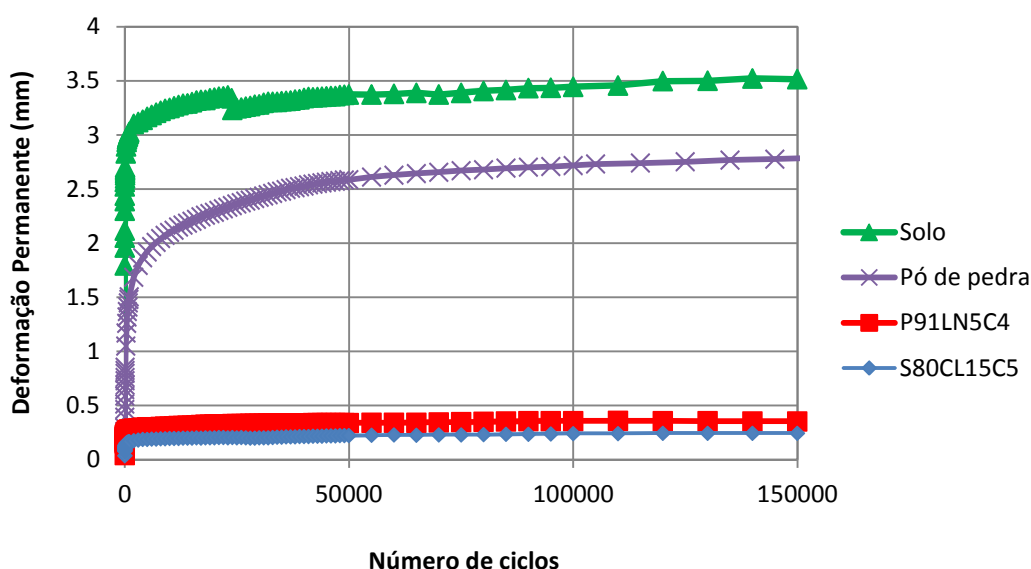


Figura 4.33: Resultados de deformação permanente das misturas e dos materiais estudados

Analisando a Figura 4.33, observa-se uma expressiva redução no valor de deformação permanente das misturas em relação aos materiais puros. Na mistura S80CL15C5, a deformação permanente total foi cerca de 14 vezes menor em relação ao solo puro, e na mistura P91LN5Ci4 a redução foi de aproximadamente 8 vezes em relação ao pó de pedra.

Nota-se que as formas das curvas apresentadas são bastante semelhantes, com rápido crescimento nos ciclos iniciais de aplicação de cargas, seguidos de uma tendência de acomodamento da deformação permanente nos restantes dos ciclos.

A mistura P91LN5Ci4 apresentou deformação permanente total aos 150.000 ciclos de 0,354mm, superior a mistura S80CL15C5 que apresentou deformação permanente total de 0,244mm. Isto se explica pelas condições de moldagem do CP de pó de pedra não terem sido as ideais. Ressalta-se, que o valor de deformação permanente da mistura P91LN5Ci4, poderia ter sido ainda menor se estivesse na umidade ótima de 7,5%. A mistura S80CL15C5 também poderia ter valor de deformação permanente reduzido se fosse ensaiado a um tempo de cura maior, de 90 dias por exemplo.

4.6. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

Visando avaliar as misturas com lodo de esgoto como material de base e sub-base para projetos de pavimentação urbana, foi utilizado o programa computacional SisPavBR versão 2.0.6.0 de novembro de 2013.

Para a composição do pavimento foram considerados três tipos de subleito, muito deformável (MR=50MPa), razoavelmente deformável (MR=100MPa) e pouco deformável (MR=300MPa). O valor do módulo de resiliência adotado para o revestimento foi de 4193MPa, e espessura variável. As camadas de base e sub-base foram compostas pelos materiais e misturas estudadas, na qual os parâmetros k_1 , k_2 e k_3 adotados foram os menores obtidos dos três corpos de prova ensaiados para cada material ou mistura. Na Tabela 4.43 estão apresentados os parâmetros adotados nesta análise paramétrica.

Foi adotado no dimensionamento tráfego baixo a médio considerando a aplicação em área urbana ($N=10^6$), conforme mostrado na Tabela 4.44, e dados do clima da cidade do Rio de Janeiro. Considerou-se a situação de uso urbano por várias razões, as duas principais são diminuir a distância de transporte do lodo e poder utilizar pequenas proporções a cada obra, por exemplo, de uma rua curta por vez, e sem precisar contar com uma grande estocagem de lodo.

Tabela 4.43: Coeficientes do modelo composto utilizados no SisPav para representar os materiais do presente estudo

Material/Mistura	k1	k2	k3
Pó de pedra	689,16	0,42	-0,065
S80CL15C5 - 28 dias de cura	702,39	0,417	-0,202
S90L5C5 - 28 dias de cura	841,3	0,575	-0,152
P91LN5Ci4 - 28 dias de cura	4798,64	0,616	0,038
P91L5Ci4 - 28 dias de cura	2706,14	0,886	-0,032

Tabela 4.44: Dados do tráfego utilizado no estudo paramétrico

Configuração	Rodas	Carga (t)	Volume por ano	N
Eixo padrão rodoviário	4	8,2	150.000	1,42E+06

Na Tabela 4.45 estão apresentadas as composições das estruturas do pavimento, para um período de projeto de 10 anos que foram consideradas adequadas no programa SisPavBR, nas condições analisadas.

Tabela 4.45: Composições estudadas das estruturas de pavimento com os materiais deste estudo

Revestimento	Base	Sub-base	Reforço do subleito	Subleito
4cm	P91LN5Ci4 - 15cm	-	-	MR=50MPa
4cm	P91LN5Ci4 - 20cm	-	-	MR=150MPa
4cm	P91LN5Ci4 - 18cm			MR=300 MPa
10cm	S80CL15C5 - 35cm	Pó de pedra - 25cm	-	MR=50MPa
10cm	S80CL15C5 - 29cm	Pó de pedra - 20cm	-	MR=150MPa
10cm	S80CL15C5 - 27cm	Pó de pedra - 20cm	-	MR=300 MPa
10cm	S80CL15C5 - 40cm	P91L5Ci4 - 30cm	-	MR=50MPa
10cm	S80CL15C5 - 40cm	P91L5Ci4 - 30cm	-	MR=150MPa
10cm	S80CL15C5 - 40cm	P91L5Ci4 - 30cm	-	MR=300 MPa
10cm	S80CL15 - 39cm	P91L5Ci4 - 30cm	S90L5C5 - 10cm	MR=300 MPa
8cm	S95C5 - 28cm	S90L5C5 - 20cm	-	MR=300 MPa

Observando os dados apresentados na Tabela 4.45, percebe-se que ambas as estruturas propostas com a utilização do resíduo lodo de esgoto, atendem com

espessuras aceitáveis, aos critérios de aceitação, definidos com um nível de confiabilidade de 85% para um nível de tráfego de $N=10^6$. Este nível de tráfego corresponde em geral a ruas de tráfego comercial relativamente alto, mostrando a viabilidade de se destinar o lodo de esgoto para compor camadas de pavimento.

Para avaliar a eficácia da utilização do lodo de esgoto, tem-se que para a construção de uma base de pavimento (nas dimensões de 0,15m x 10m x 1000m) com mistura de pó de pedra, cimento e 5% de lodo in natura, seriam necessários cerca de 162t de lodo, o equivalente a produção de 13 dias na Estação de Tratamento de Esgoto Alegria. Em um ano de lodo gerado nesta estação, poderiam ser construídos cerca de 27km desta base.

No caso da base com 27cm composta pela mistura de solo, 15% de cinza e 5% de cal, seriam necessários cerca de 623t de cinza, considerando a construção de 1km de pavimento com 10m de largura. Para a produção dessa cinza, seriam precisos cerca de 1327t de lodo in natura, ou seja, a produção de três meses e meio na ETE Alegria.

A mistura P91LN5Ci4, foi a que obteve melhor comportamento mecânico, apresentando valores baixos de espessura de base para as três condições de subleito. Como a mistura encontra-se bastante rígida, foi possível economizar no revestimento asfáltico, utilizando uma espessura de 4cm.

Através do programa SisPavBr foi possível também analisar o dano de fadiga desta camada cimentada. Para isso, a camada de base foi considerada como uma Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), com valor de módulo de resiliência constante de 1380MPa, e resistência a tração de 0,03MPa obtida através de ensaio de resistência a tração por compressão diametral. Os resultados obtidos mostraram que a camada não apresentou danos de fadiga significativos.

Para as outras misturas estudadas, as espessuras das camadas de base calculadas foram muito superiores. Além disso, foi necessário aumentar a espessura do revestimento para 10cm, e adicionar camada de sub-base. Mesmo assim, os padrões de estrutura estão parecidos com os padrões usuais atuais de pavimento utilizados nas ruas do Rio de Janeiro, por exemplo.

Nota-se para a mistura com 10cm de revestimento, 40cm de base composta pela mistura com cinza de ETE e sub-base de P91L5Ci4 de 30cm, que o valor do módulo de resiliência do subleito não teve influência na análise do dimensionamento. Visando diminuir a camada de base desta composição, foi acrescentada uma camada de reforço de subleito, composta pela mistura S90L5C5, porém esta não trouxe nenhuma vantagem ao dimensionamento.

No Anexo D, encontram-se algumas análises realizadas no Programa SisPavBR (2013).

4.7. CONSIDERAÇÕES DAS MISTURAS ESTUDADAS

Para a avaliação da aplicabilidade e viabilidade do resíduo lodo de esgoto em camadas de base e sub-base de pavimentos, procurou-se priorizar nas características de maior importância dessas misturas: a análise mecânica através de ensaios de módulo de resiliência, análise ambiental do resíduo e expansão das misturas.

Na Tabela 4.46 estão apresentados os valores constantes dos módulos de resiliência das misturas estudadas para comparação. Escolheu-se duas tensões confinantes, a menor tensão de $\sigma_3=0,021\text{MPa}$ e a maior tensão de $\sigma_3=0,137\text{MPa}$. Os valores foram obtidos a partir das linhas de tendência das expressões de MR em função de σ_3 .

Tabela 4.46: Resultados dos valores de módulo de resiliência das misturas e materiais estudados para o menor e maior nível de tensão confinante

Material/Mistura	Idade de cura (dias)	Módulo de Resiliência	
		$\sigma_3=0,021\text{MPa}$	$\sigma_3=0,137\text{MPa}$
S90L5C5	7	260	241
	28	234	459
S95C5	7	243	419
	28	330	875
P91L5Ci4	7	136	435
	14	141	513
	28	116	530
P91LN5Ci4	7	306	827
	17	275	932
	28	361	1392
S80CL15C5	7	305	440
	28	251	470

Para melhor interpretação, os dados da Tabela 4.46 foram ilustrados em gráfico de barras, conforme apresentado nas Figuras 4.34 e 4.35.

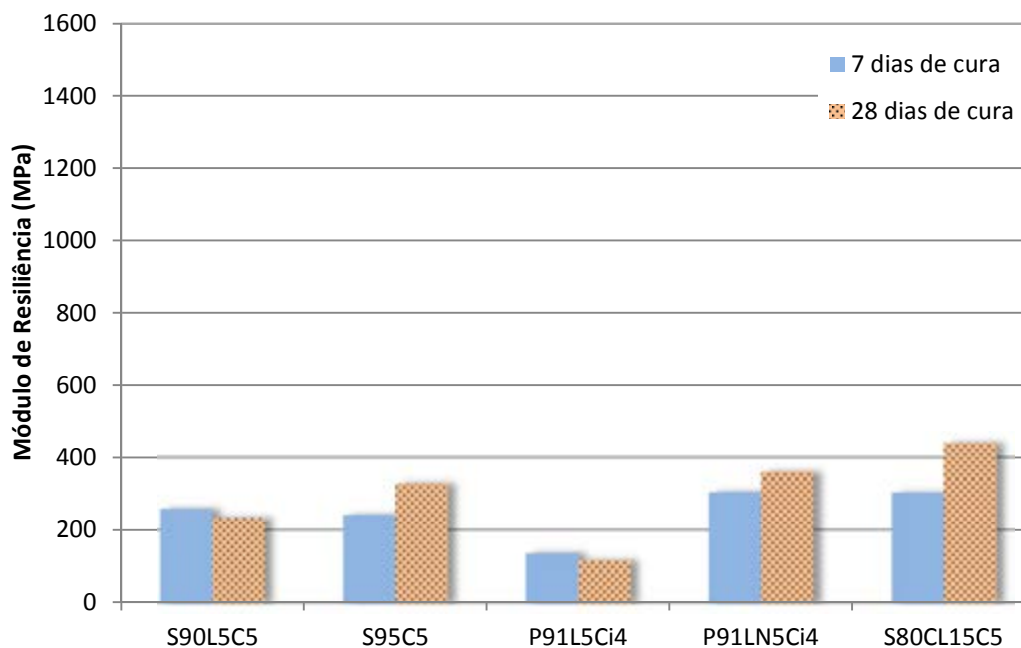


Figura 4.34: Resultados de módulo de resiliência das misturas e materiais deste estudo para tensão confinante de 0,021MPa

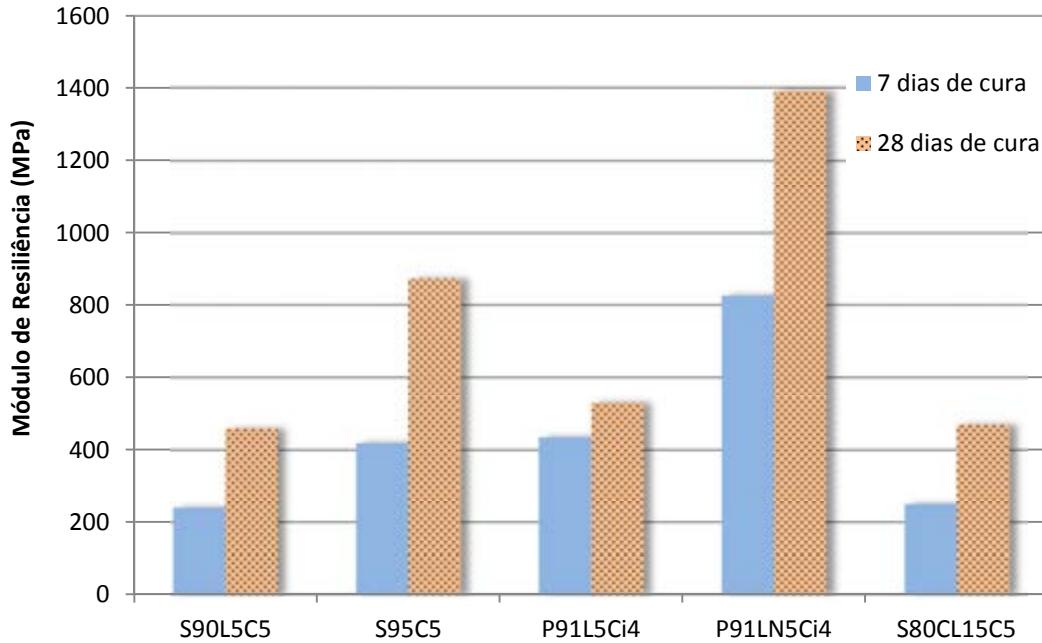


Figura 4.35: Resultados de módulo de resiliência das misturas e materiais para tensão confinante de 0,137MPa

Verifica-se que ambas as misturas com estabilizantes utilizadas apresentam valores de módulo de resiliência satisfatórios para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos se comparadas aos valores usuais de brita graduada por exemplo.

Nota-se que a adição do resíduo tem grande influência no valor de módulo de resiliência obtido. Em relação à mistura solo cal na idade de 28 dias e tensão confinante de 0,137MPa, verifica-se uma diminuição de cerca de 52%, quando se adiciona 5% de resíduo seco a 60°C destorroado (Mistura S90L5C5). Isto ocorreu devido ao lodo conter matéria orgânica em sua composição, inibindo as reações pozolânicas da mistura.

Para a mistura S80CL15C5, a redução do módulo de resiliência foi cerca de 54% em relação a mistura solo-cal. Segundo a Tabela 4.46, observa-se que a mistura contendo cinza não obteve grande acréscimo do módulo de resiliência com o tempo de cura em comparação ao solo-cal, ou seja, a cinza de lodo de ETE apresentou baixa propriedade pozolânica.

A mistura com pó de pedra, cimento e lodo natural foi a que obteve maiores valores de módulo de resiliência, para as duas tensões confinantes analisadas. Em comparação à mistura P91L5Ci4, observa-se grande diferença dos valores de módulo de resiliência, isto pode ser explicado pelo fato de que o lodo natural apresenta uma grande percentagem de água em sua composição, reduzindo a parte sólida do resíduo.

A mistura com lodo in natura também apresentou vantagens quanto à expansão, apresentando valor inferior a 0,5%, podendo ser utilizada como material de base e sub-base de pavimentos. A mistura P91L5Ci4 também apresentou valor abaixo de 0,5%, já as misturas com solo obtiveram valores de expansão próximo a 1%, compatível com sub-base, mas se medido com tempo de cura maior poderá ser menor a expansão residual.

Da análise ambiental do resíduo, tanto in natura como em cinza, não foram detectados metais pesados acima do limite estabelecido pela NBR 10004/2004, e portanto não oferecem riscos ao meio ambiente e a saúde pública.

Muitos trabalhos estudaram a estabilização/solidificação para encapsulamento de contaminantes, e mostraram resultados positivos em relação a técnica. Lucena (2012) analisou através de modelo reduzido exposto ao tempo, o impacto ambiental causado pela utilização do lodo de esgoto em base e sub-base de pavimentos por coleta e análise da água percolada. O modelo serviu para avaliar a possível contaminação na percolação da água da chuva. Foram observados e analisados, concomitantemente ao estudo de lixiviação de metais, parâmetros como recalque, variação de pH e umidade, para analisar se a mistura encontrava-se estabilizada. Os resultados obtidos pela autora, indicaram que não houve lixiviação de metais pesados nos períodos analisados para o resíduo lodo de esgoto, e a técnica de encapsulamento com cimento foi considerada satisfatória.

Na análise microbiológica do lodo in natura do presente estudo, foram detectados coliformes termotolerantes, devendo-se tomar cuidado no manuseio deste resíduo. Quanto às misturas utilizando o lodo, verifica-se na literatura que a utilização da cal e cimento tendem a aumentar o pH da mistura e com isso, eliminar os patogênicos presentes no resíduo, não representando riscos.

Uma outra condição que deve ser comentada, refere-se à execução das misturas em campo. A mistura com lodo in natura tem vantagem em relação a cinza, por não incluir custos de queima, tendo como único custo adicional o transporte do material. Uma opção sugerida para a aplicação da mistura com lodo in natura no campo, é utilizar um caminhão betoneira para garantir a melhor homogeneização da mistura, o que seria uma opção em cidades pequenas que não disponham de usina de solo. Outra opção poderia ser utilizar máquinas recicladoras ou adaptar tanques espargidores com barras compatíveis com a “liquidez” do lodo para espalhar o material sobre o solo ou pó de pedra, como parte da água de molhagem, e depois fazer o gradeamento do conjunto, inclusive do ligante hidráulico, previamente espalhado na pista também.

A próxima etapa a fim de verificar estas proposições poderia ser um teste de algumas delas no tanque-teste do laboratório de Geotecnia da COPPE e em seguida em trechos experimentais.

Conclui-se que dentre as misturas estudadas, a mistura composta por lodo in natura, pó de pedra e cimento foi a que obteve os melhores resultados de módulo de resiliência e expansão, podendo ser utilizada em camadas de base e sub-base de pavimentos. Além disso, esta mistura mostrou-se mais econômica em relação as outras por não apresentar custos adicionais de queima do resíduo e também por apresentar no dimensionamento do pavimento, menor espessura de base.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS

5.1. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo estudar a possibilidade de disposição final e segura de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), para compor as camadas de base e sub-base de pavimentos. Foram testadas a utilização desse material em suas diferentes formas : in natura, seco em estufa a 60°C e calcinado em mufla em temperatura de 550°C, em misturas com solo e pó de pedra, e também com uso de estabilizantes.

Dois fatores foram preponderantes na escolha da melhor mistura: o ambiental, no que diz respeito às exigências da NBR 10.004/2004, e o mecânico, através de ensaios de Módulo de Resiliência. Dentre as misturas estudadas, constatou-se que a mistura composta por lodo in natura apresentou os melhores parâmetros, podendo ser utilizado em camadas de base e sub-base de pavimentos.

Com base nos resultados obtidos de todas as combinações testadas, pode-se traçar as seguintes conclusões:

- 1) Nos ensaios ambientais de lixiviação e solubilização, o resíduo lodo de esgoto in natura e a cinza de lodo de esgoto, foram classificadas como Resíduo Classe II A – Resíduo Não Inerte, na qual devem ser tomadas medidas seguras de disposição do resíduo.
- 2) Os resultados obtidos no Experimento Piloto, apontaram valores de Módulo de Resiliência inversamente proporcionais ao teor de lodo adicionado, ou seja, a adição de lodo de esgoto puro não trouxe nenhuma melhoria aos materiais em termos de deformabilidade.
- 3) As misturas com estabilizantes, cal ou cimento, para os dois materiais – solo e pó de pedra - e lodo nas condições utilizadas apresentaram valores de módulo de resiliência satisfatórios para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos. Observou-se que a adição dos estabilizantes se mostrou um fator positivo para a deformabilidade, apresentando valores de Módulo de Resiliência

muito maiores em relação às misturas sem estabilizantes, deformações permanentes menores e menores expansões.

- 4) A mistura com pó de pedra, cimento e lodo in natura foi a que obteve maiores valores de módulo de resiliência, menor expansão e melhor economia com menor espessura de base no dimensionamento do pavimento.
- 5) No dimensionamento de anteprojeto de estruturas de pavimentos com as misturas testadas mostra-se que é viável a utilização destes materiais com espessuras razoáveis para várias combinações de condições, para um tráfego de $N = 10^6$, compatível com ruas de tráfego comercial.
- 6) Os resultados permitem concluir que o solo estudado, segundo a Classificação Unificada é um solo SC, ou seja, uma areia argilosa e no sistema HRB é classificado como A-7-6, ou seja um solo de comportamento ruim, não recomendado o seu uso em camadas de pavimento. Já o pó de pedra, classificou-se segundo a Classificação Unificada como GW, pedregulho bem graduado e na Classificação HRB é um material A-2-4, classificado como um material excelente para subleito. O uso do lodo e do estabilizante em teores relativamente baixos viabiliza o emprego de ambos em camadas de base e sub-base.
- 7) Quanto a caracterização mecânica dos materiais, os resultados obtidos dos ensaios de módulo de resiliência do solo demonstraram que este é dependente da tensão desviadora. Já o pó de pedra possui comportamento contrário, dependente da tensão confinante e seus valores são relativamente baixos.
- 8) Pelos resultados de deformação permanente apresentados pode-se concluir que a utilização do solo e do pó de pedra como camada de pavimento deve ser condicionada a uma situação de trabalho com baixas tensões, pois estados de tensões muito altos poderão produzir significativas deformações permanentes nas camadas destes materiais. O uso do lodo + estabilizante melhora muito esta condição.

- 9) Os resultados de composição química dos materiais solo, pó de pedra e lodo apresentaram maior quantidade dos compostos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , que são os principais componentes atuantes no processo de estabilização. Observou-se que ao calcinar o lodo, houve um aumento das proporções dos compostos químicos. Apesar destes compostos já estarem presentes no lodo “in natura”, pode-se dizer que devido à volatilização de determinadas substâncias, acabou gerando um aumento na concentração destes compostos, ficando retidos na cinza de lodo de ETE.

Portanto, pode-se concluir, que o resíduo lodo de esgoto estudado pode ser utilizado em camadas de base e sub-base de pavimentos com uso de estabilizantes, cal ou cimento, representando uma alternativa para a redução do grave problema ambiental resultante da disposição inadequada deste resíduo no meio ambiente.

À medida que vários trabalhos de pesquisa apresentarem resultados de viabilidade técnica e houver maior conscientização do elevado custo da destinação final do resíduo, o uso deste na pavimentação poderá ser realizado.

5.2. SUGESTÕES FUTURAS

Com o intuito de dar continuidade e complementar esta pesquisa propõem-se as seguintes sugestões para pesquisas posteriores:

- Estudar outros teores de estabilizantes nas misturas e outros estabilizantes alternativos;
- Estudar outras temperaturas de queima da cinza de lodo de esgoto, e avaliar outras porcentagens a serem adicionadas nas misturas;
- Analisar a variabilidade do lodo de esgoto, estudando as características físicas, químicas, mineralógicas e microbiológicas do resíduo em diferentes Estações de Tratamento de Esgoto;
- Avaliar a estabilização/solidificação das misturas por pluviação artificial no tanque-teste ou com uso de modelo reduzido;

- Construir trechos experimentais com base de pó de pedra e lodo in natura, monitorando seu comportamento mecânico e interações ambientais no decorrer do tempo;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDA 21 BRASILEIRA. **Capítulo 21** – Manejo ambiental saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com os esgotos, 2003. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global/item/681>. Data de acesso: 22/01/2014.

AGOSTINI, R. M. **Solidificação/Estabilização de resíduos sólidos oleosos de atividades de exploração e produção de óleo e gás em matrizes de cimento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

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.

ALAMINO, R. C. J. **A utilização de lodo de esgoto como alternativa sustentável na recuperação de solos degradados: viabilidade, avaliação e biodisponibilidade de metais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

ANDREOLI, C.V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro, ABES, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Lixiviação de resíduos: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Solubilização de resíduos: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.600**: Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro, 1996.

BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**, Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEDA, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – Lei de crimes ambientais – **Lei Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**, Brasília, 1998.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente–Política Nacional de Resíduos Sólidos – **Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**, Brasília, 2010

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. Resolução **CONAMA nº 375/2006**, de 30 de agosto de 2006.

BRAZ, D.M. **Estudo das etapas de tratamento da Estação de Tratamento de Esgoto de Alegria no município do Rio de Janeiro**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário Augusto Motta, UNISUAM. Rio de Janeiro, 2012.

BUDNY, J. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CÁPUA ENGENHARIA. **Galeria de fotos**. Disponível em:<http://www.capua.com.br/galeria_foto_01/fotos/obra5/004.jpg>. Data de acesso: 15/11/2013.

CASANOVA, F.J., CERATTI J. A., RODRIGUES, M.G.M. **Procedimento para dosagem físico-química do solo-cimento**. In: Reunião de Pavimentação, 25. Aracaju, 1992.

CASTRO, F.J.C.O. **Contribuição ao conhecimento e a determinação da reatividade de solos sesquióxidos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização)**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

CORDEIRO, J. S. F. **Estabilização química e Solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo com solo para uso em camadas de base e/ou sub-base de pavimentos rodoviários.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007.

DELGADO, B. G; OSTEN, F.B.V.D.; GUIMARÃES, A.C.R.; MOTTA, L.M.G. **Análise mecanicista da aplicabilidade de um solo laterítico concrecionado como camada de sublastro na estrada de ferro Carajás.** ABPV – 42^a Reunião Anual de Pavimentação, Gramado, 12p., 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 049/94:** Solos – Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134/2010:** Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 139/2010:** Pavimentação – Solos – Sub base estabilizada granulometricamente– Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 143/2010:** Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 160/2012:** Solos – Determinação da expansibilidade – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

DOURADO, I.N. **Avaliação da aplicabilidade de cinzas de fundo de Resíduo Sólido Urbano (RSU) em camadas de pavimento.** Trabalho de Conclusão de

Curso. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

DUARTE, A. C. L. **Incorporação de lodo de esgoto na massa cerâmica para fabricação de tijolos maciços: uma alternativa para disposição final do resíduo.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

EADES, J.L; GRIM, R.E. **A quick test to determine lime requirements for lime stabilization.** *Highway Research Record*, Washington, D.C, n. 61-72, 1966.

FONTES, C. M. A. **Potencialidades da cinza de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

FRANCO, F.A.C.P. **Um sistema para Análise Mecânica de Pavimentos Asfálticos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000.

FRANCO, F.A.C.P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

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

GONDIM, L. M., **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo Jaguaribe/estado do Ceará.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.

GUIMARÃES, A.C.R. **Estudo de deformação permanente em solos e a teoria do shakedown aplicada a pavimentos flexíveis.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2001.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia.** 2ª Ed. São Paulo: Pini, 2002.

GUIMARÃES, A.C.R. **Um método mecanístico empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/default.shtm>. Acesso em: 01/04/2013.

JORDÃO, E.P.; PESSÔA, C.A., **Tratamento de esgotos domésticos.** 6ª ed. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 2011.

LESSA, G.T. **Contribuição ao estudo da viabilidade da utilização do lodo de estação de tratamento de esgoto misto na construção civil.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2005.

LOPES, L. S. E. **Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de base de pavimentos.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado a pavimentação.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LUCENA, L. C. F. L. **Estudo de aplicação de misturas solo lodo em base e sub-base de pavimentos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife –PE, 2012.

MACÊDO, M.M. **Solos modificados com cimento - efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2004.

MEDEIROS, S.A. **Incorporação do lodo de tanque séptico como matéria-prima de uma mistura asfáltica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2006.

MEDINA, J., MOTTA, L.M.G. **Apostila de estabilização de solos.** Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J., MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro, RJ. 2ª Ed, 2005.

MIRANDA, L.P. **Análise do comportamento mecânico de pavimento reforçado com geossintético sob carregamento cíclico em modelo físico de verdadeira grandeza.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

MONISMITH, C.L.; OGAWA, N. FREEME, C.R. **Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repetead Loading.** 54th Annual Metting of the Transportation Research Board, Washington, DC., 1975.

MOTTA, L. M. **Método e dimensionamento de pavimentos flexíveis, Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PEDROZA, M.M., VIEIRA, G.E.G., SOUZA, J.F., PICKLER, A.C., LEAL, E.R.M., MILHOMEN, C.C. **Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão.** Revista Liberato, Novo Hamburgo, v.11, n. 16, p. 89-188, jul/dez, 2010. Disponível em: <http://www.liberato.com.br/upload/arquivos/0121121014101925.pdf>. Acesso em: 20/03/2013.

PEREIRA, K.L.A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2012.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas.** 2ª Ed. – São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

RAMOS, C. R. **Estudo do desenvolvimento de um catálogo de pavimentos flexíveis do município do Rio de Janeiro.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

REZENDE, D.S.V. **Comportamento mecânico de alguns tipos de solo através de ensaios triaxiais de cargas repetidas para projetos de pavimentos rodoviários.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2009.

SABESP. **Esgotos / Tratamento de esgotos.** Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=49>. Acesso em: 20/03/13.

SANTOS, P.S. **Tecnologia de argilas, aplicada as argilas brasileiras.** v. 1. São Paulo ,Ed. Edgard Blücher e Ed. Da Universidade de São Paulo, 1975.

SANTOS, A.D. **Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgotos da região metropolitana de São Paulo.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SANTOS, J. **Estabilização de uma argila laterítica do Distrito Federal para uso em rodovias de baixo volume de tráfego**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2004.

SANTOS, C.B. **Estabilização/Solidificação de um resíduo da indústria de petróleo para uso em pavimentos rodoviários**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

SATO, Y.; OYAMADA, T.; HANEHARA, S. **Aplicability of sewage sludge ash (SSA) for paving materials: A study on using SSA as filler for asphalt mixture and base course material**. In: Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, Japan, 2013. Disponível em: <http://www.claisse.info/2013%20papers/data/e283.pdf>. Acesso em: 02/04/2014.

UBALDO, M. O., MOTTA, L. M., ODA S., NASCIMENTO, L.A.H. “Implicações ambientais na utilização de rejeitos da exploração e produção de petróleo em pavimentação – uma discussão”. **COBRAMSEG 2010: Engenharia Geotécnica para o desenvolvimento, inovação e sustentabilidade**, Gramado-RS, Brasil, Agosto de 2010.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **Tractability Studies for solidification/stabilization of contaminated material**. Technical Letter N° 1110-1-158. Washington, 1995.

ZAPAROLLI, D. **Ampliação do saneamento básico e novas normas devem ampliar o uso de lodo de esgoto como fertilizante**. Disponível em: <http://www.quimicaederivados.com.br/revista/qd461/ambiente1.htm>. Acesso em: 25/02/2014.

ANEXO A

Relatórios dos ensaios microbiológicos do lodo



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPTO. DE RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE

ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS E BACTERIOLÓGICOS

Interessado: Tamile
Origem: Lodo ETE – Alegria
Data da coleta: **Não informado**

RESULTADOS

Coli. Termotolerante NMP/100 ml	ST mg/L	SF mg/L	SV mg/L	Umidade %
00	243.585,0	120.270,0	123.315,0	74,8

Os resultados desta amostra têm caráter restrito e se aplicam somente à amostra executada.

Metodologias:

Sólidos Totais/Fixos/ Voláteis – Método 2540 B – Gravimétrico – SMEWW- 20⁰ Edição

Coliformes Termotolerantes – Manual de Métodos para Análises Microbiológicas e Parasitológicas em Reciclagem Agrícola de Lodo de Esgoto – Cléverson Vitório Andreoli e Bárbara Rocha Pinto Bonnet – SANEPAR/ PROSAB– (página: 43)

Umidades (65⁰C) em amostras de lodo de esgoto - Manual de Métodos para Análises Microbiológicas e Parasitológicas em Reciclagem Agrícola de Lodo de Esgoto – Cléverson Vitório Andreoli e Bárbara Rocha Pinto Bonnet – SANEPAR/ PROSAB– (página: 73)

Em, 05 de julho de 2013


Prof. Maria Cristina Treitler Paixão
Lab. Engenharia do Meio Ambiente
DFH-11A - Escola de Engenharia
CRB. 02942/02



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPTO. DE RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE

ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS E BACTERIOLÓGICOS

Interessado: Tamile
Origem: Lodo ETE – Alegria
Data da coleta: **Não informado**

RESULTADOS

Coli. Termotolerante NMP/100 ml	ST mg/L	SF mg/L	SV mg/L	Umidade %
24.000	155.353,3	101.740	53.613,3	78,2

Os resultados desta amostra têm caráter restrito e se aplicam somente à amostra executada.

Metodologias:

Sólidos Totais/Fixos/ Voláteis – Método 2540 B –Gravimétrico – SMEWW- 20^oEdição

Coliformes Termotolerantes – Manual de Métodos para Análises Microbiológicas e Parasitológicas em Reciclagem Agrícola de Lodo de Esgoto – Cléverson Vitório Andreoli e Bárbara Rocha Pinto Bonnet – SANEPAR/ PROSAB– (página: 43)

Umidades (65^oC) em amostras de lodo de esgoto - Manual de Métodos para Análises Microbiológicas e Parasitológicas em Reciclagem Agrícola de Lodo de Esgoto – Cléverson Vitório Andreoli e Bárbara Rocha Pinto Bonnet – SANEPAR/ PROSAB– (página: 73)

Em, 13 de novembro de 2013


Prof. Maria Cristina Treitler Paixão
Lab. Engenharia do Meio Ambiente
DFR-EMA - Escola de Engenharia
CRB. 02942/02

Boletim de Ensaio

Emitido em: 14/02/2014

Orçamento Nº: 0421/2014

Amostra Nº: 3364/2014

Análise em amostras de SOLO

Cliente: FUNDAÇÃO COPPETEC

Endereço: CGTEC CT2 Rua Moniz Aragão, 0 Ilha do Fundão - Ilha do Governador - Rio de Janeiro/RJ - CEP 21941-972

Localização do Projeto: Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ

Data da Coleta: 10/12/2013 00:00

Entrega das amostras: 12/12/13

Início dos ensaios/exatidão: 10/02/2014

Término dos ensaios: 14/02/2014

Gerente do Projeto: Laura Motta

 INNOLAB do Brasil Ltda.
 Rua Sacadura Cabral - 236
 Saúde - Rio de Janeiro - RJ
 Cep. 20221-161
 CNPJ. 06.183.043/0001-00
 Tel. (21) 3609-1760
 Fax (21) 2233-4621

Identificação da Amostra: Lodo de ETE In natura
Análises Subcontratadas

Parâmetro	Resultado	L.Q.	L.B.	Unidade	Método
Ovos viáveis de helmintos *	AUSÊNCIA	0,10			--
Pesquisa de Salmonella *	AUSÊNCIA	1,00			--

Análises de Microbiologia

Parâmetro	Resultado	L.Q.	L.B.	Unidade	Método
Coliformes Termotolerantes *	2,1	1,8	0,8	NMP/100mL	--

Padrões de Controle Analítico (PCA)

Concentração esperada	Concentração obtida

1. Legenda

- L.D. – Limite de detecção reportado
- L.Q. – Limite de Quantificação reportado
- na – Não analisado
- nd – Não detectado
- D – diluição

2. Foram utilizados Brancos de Controle conforme metodologia informada.

3. Caso a amostragem não tenha sido realizada pela equipe da Eurofins Innolab, os resultados apresentados referem-se a amostra como recebida.

4. Os métodos utilizados neste(s) ensaio(s) apresentam-se conformes em relação ao método referenciado. Caso o(s) ensaio(s) tenha(m) apresentado desvio(s), adições ou exclusões, estes estarão listados no item informações adicionais do relatório.

5. Os valores para amostras sólidas são reportados em base seca.

6. As metodologias utilizadas nos ensaios encontram-se referenciadas ao final de cada parâmetro. As metodologias acreditadas poderão ser localizadas no site do INMETRO sob CRL 0310.

7. Este Boletim de Ensaio só deverá ser reproduzido por completo.

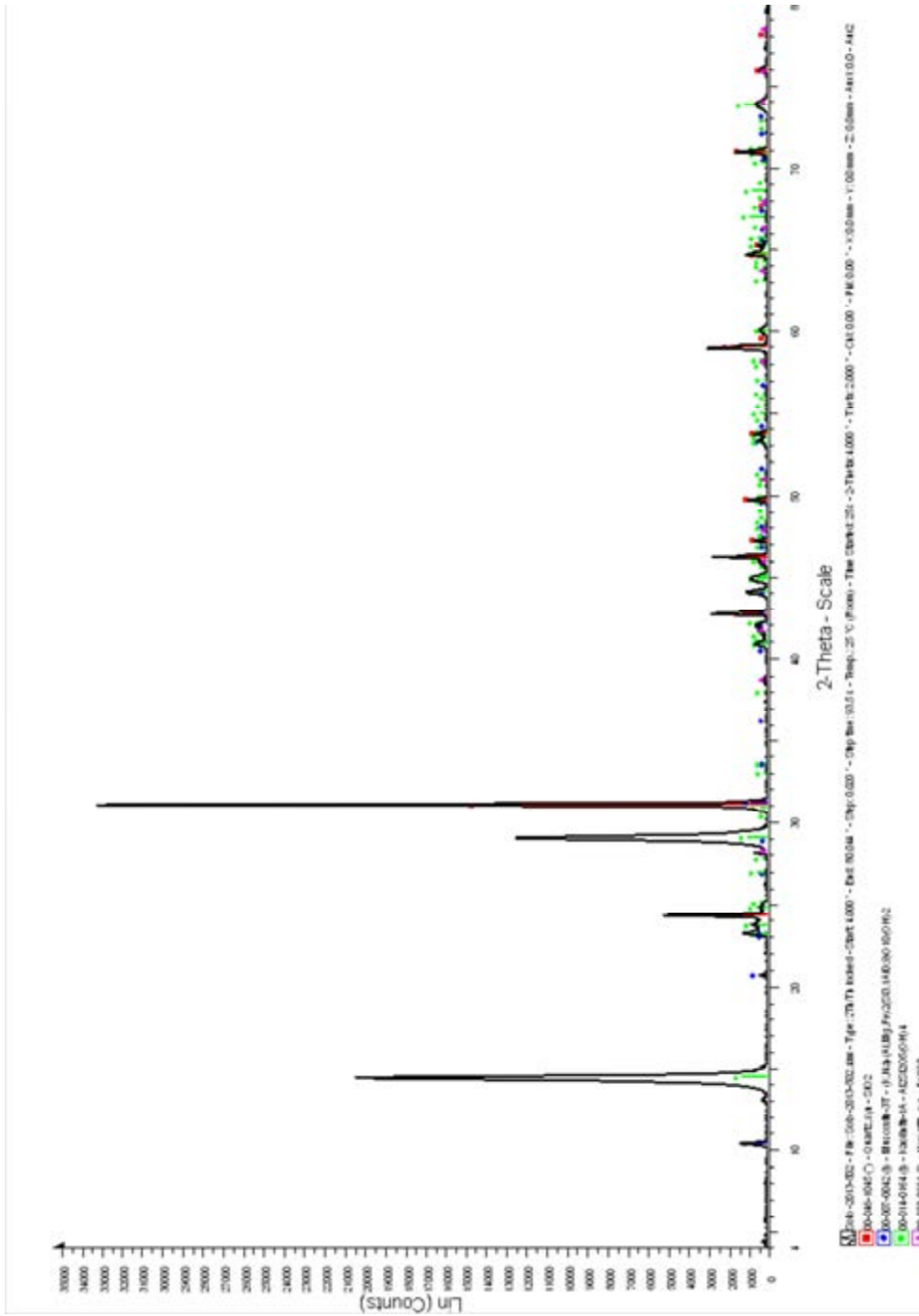
8. (*) = Análises terceirizadas ou subcontratadas em laboratórios acreditados e homologados pela Eurofins Innolab


Mauro Machado
Diretor da Linha de Negócios de Meio Ambiente

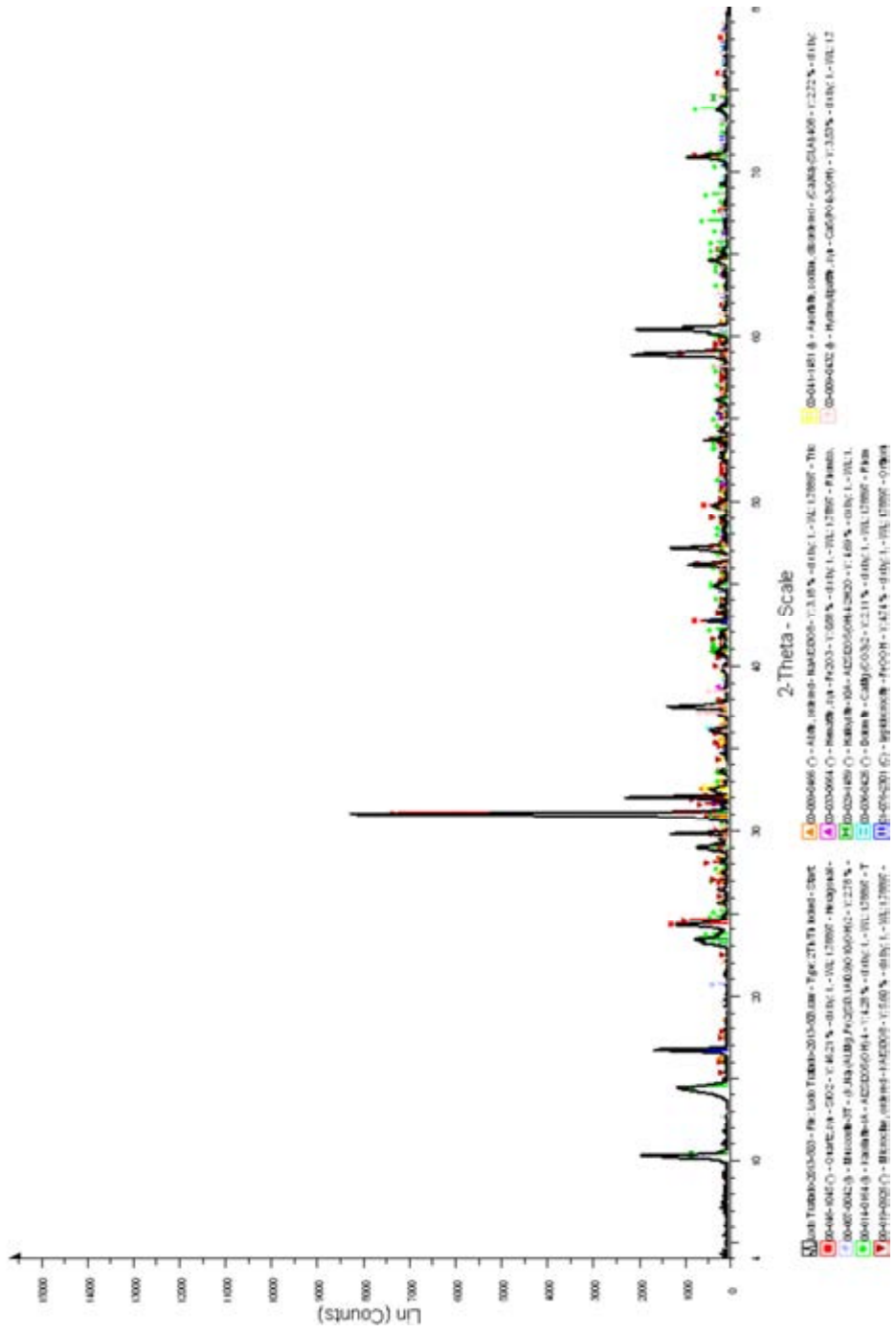
ANEXO B

Gráficos de DRX dos materiais

DRX do solo



DRX do lodo de ETE – primeira coleta



ANEXO C

Relatórios dos ensaios de lixiviação e solubilização do lodo in natura e cinza de lodo de ETE



Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre/Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025.



Innolab

Boletim de Ensaio

Pág. 1 de 4

Resp. Téc.: Mauro Machado

Emitido em: 22/11/2013

Lab-nº 13-9086

Análise para caracterização de resíduo

Cliente Fundação COPPETEC
Localização do Projeto Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ
Data da Coleta 15/10/2013
Entrega das amostras 15/10/2013
Início dos ensaios/extração 16/10/2013
Término dos ensaios 22/11/2013

Eurofins Innolab
 Rua Sacadura Cabral - 236
 Saúde - Rio de Janeiro - RJ
 Cep. 20221-161
 CNPJ. 04.183.043/0001-00
 Tel. (21) 3509-1750
 Fax (21) 2233-4621

Projeto Não Fomecido
Gensnte do Projeto Laura Motin

1. Introdução

Foram realizados ensaios na amostra coletada para enquadramento de seu resíduo conforme a ABNT NBR-10004:2004.

Identificação da amostra Lodo de Esgoto

2. Ensaio

2.1 – Lixiviação

Foi realizado ensaio de lixiviação no resíduo de acordo com a ABNT NBR-10005:2004, onde foi encontrado:

a) Teor de Sólidos Secos (%) 26,6
 b) pH do extrato lixiviado obtido (n) 5,18
 c) Tempo de Lixiviação (h) 18
 d) Volume de Líquido (ml) 1000

No extrato lixiviado foram realizados ensaios químicos e os resultados obtidos para os elementos ensaiados foram comparados com os limites estabelecidos pela NBR 10004:2004 – Anexo F, conforme tabela abaixo:

Parâmetros	Resultado	L.M.L.	L.O.
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Inorgânico			
Arsênio	N.D.	1,0	0,01
Bário	N.D.	70,0	0,04
Cádmio	0,002	0,5	0,002
Chumbo	N.D.	1,0	0,006
Cromo total	0,004	5,0	0,003
Mercurio	N.D.	0,1	0,0005
Prata	N.D.	5,0	0,002
Selênio	N.D.	1,0	0,01



Laboratório de Ensaio acreditado
pela Cgcre/Inmetro de acordo com
a ABNT NBR ISO/IEC 17025.



Innolab

Boletim de Ensaio

Pág. 2 de 4

Resp. Téc.: Mauro Machado

Emitido em: 22/11/2013

Lab-nº 13-9086

Pesticidas			
Aldrin	N.D.	0,003	0,00003
Dieldrin			
DDT			
DDD	N.D.	0,2	0,00003
DDE			
Endrin	N.D.	0,06	0,00003
Lindano	N.D.	0,2	0,00003
Metoxicloro	N.D.	2,0	0,00003
Pentaclorofenol	N.D.	0,9	0,003
Outros orgânicos			
Benzeno	N.D.	0,5	0,001
Benzo(a)pireno	N.D.	0,07	0,0001
Cloreto de vinila	N.D.	0,5	0,001
Clorobenzeno	N.D.	100	0,001
Clorofórmio	N.D.	6,0	0,001
Cresol total	N.D.	200,0	0,01
o-cresol	N.D.	200,0	0,01
m-cresol	N.D.	200,0	0,01
p-cresol	N.D.	200,0	0,01
1,4-diclorobenzeno	N.D.	7,5	0,001
1,2-dicloroetano	N.D.	1,0	0,001
1,1-dicloroetileno	N.D.	3,0	0,001
hexaclorobenzeno	N.D.	0,1	0,01
hexaclorobutadieno	N.D.	0,5	0,005
tetracloreto de carbono	N.D.	0,2	0,001
tetracloroetileno	N.D.	4,0	0,001
tricloroetileno	N.D.	7,0	0,001
2,4,5-triclorofenol	N.D.	400,0	0,003
2,4,6-triclorofenol	N.D.	20,0	0,003

2.3 – Solubilização

Foi realizado ensaio de solubilização no resíduo de acordo com a ABNT NBR-10006:2004, onde foi encontrado:

a) Teor de Sólidos Secos (%)	26,6
b) pH do extrato obtido	7,3
c) Tempo de Solubilização (d)	7
d) Volume de Líquido (mL)	1000

No extrato solubilizado foram realizados ensaios químicos e os resultados obtidos para os elementos ensaiados foram comparados com os limites estabelecidos pela NBR 10004:2004 – Anexo G, conforme tabela abaixo:



Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre/Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025.



Innolab

Boletim de Ensaio

Pág. 3 de 4

Resp. Téc.: **Mauro Machado**

Emitido em: 22/11/2013

Lab-nº 13-9086

Parâmetro	Resultado (mg/L)	L.M.S (mg/L)	L.Q. (mg/L)
Inorgânico			
Arsênio	N.D.	0,01	0,01
Alumínio	N.D.	0,2	0,02
Bário	N.D.	0,7	0,04
Cádmio	N.D.	0,005	0,002
Chumbo	0,007	0,01	0,006
Clorato	12,0	250,0	3
Cobre	N.D.	2,0	0,002
Cromo total	N.D.	0,05	0,003
Ferro	0,17	0,3	0,03
Manganês	0,045	0,1	0,005
Mercurio	N.D.	0,001	0,0005
Nitrato (expresso em N)	0,90	10,0	0,01
Prata	N.D.	0,05	0,002
Selênio	N.D.	0,01	0,01
Sódio	23,24	200,0	0,04
Zinco	N.D.	5,0	0,008
Orgânicos			
Aldrin	N.D.	0,00003	0,00003
Dieldrin			
DDT			
DDD	N.D.	0,002	0,00003
DDE			
Endrin	N.D.	0,0006	0,00003
Lindano	N.D.	0,002	0,00003
Fenóis totais	N.D.	0,01	0,001
hexaclorobenzeno	N.D.	0,001	0,00003

continua

3. Conclusão

Conforme com os ensaios acima descritos realizados na amostra seguindo as orientações previstas na ABNT NBR 10004:2004, conclui-se que a amostra analisada se enquadra como:

Resíduo Perigoso - Classe I ()
 Resíduo não Inerte - Classe II A (X)
 Resíduo Inerte - Classe II B ()



Laboratório de Ensaio acreditado
pela Cgcre/Inmetro de acordo com
a ABNT NBR ISO/IEC 17025.



Innolab

Boletim de Ensaio

Pág. 4 de 4

Resp. Téc.: **Mauro Machado**


Emitido em: 22/11/2013

Lab-nº 13-9086

Observações

1. Legenda
 - L.D. – Limite de detecção reportado
 - L.Q. – Limite de Quantificação reportado
 - na – Não analisado
 - N.D. – Não analisado
 - D – diluição
2. Ref. Métodos – ABNT NBR 10.005:2004 // ABNT NBR 10.008:2004 // ABNT NBR 14898:2000 // US EPA 519 B48
3. Formas utilizadas Branco de Controle conforme metodologia informada.
4. O laboratório não é o responsável pela amostragem, portanto, os resultados contidos neste boletim referem-se exclusivamente às amostras nele descritas, que foram coletadas e enviadas pelo solicitante.
5. Os métodos utilizados neste(s) ensaio(s) apresentam-se conformes em relação ao método referenciado. Caso o(s) ensaio(s) tenha(m) apresentado desvio(s), adições ou exclusões, estes estarão listados no item informações adicionais do relatório.
6. Este Boletim de Ensaio só deverá ser reproduzido por completo.
7. As metodologias acreditadas poderão ser localizadas no site do INMETRO sob CRL 0310


Mauro Miranda de Souza
CRQ 1ª Região: 02311254
Chefe Laboratório


CAROLINA SANTOS CASAL
Chefe Laboratório
Quilombo
CRQ - 00251114

Boletim de Ensaio

Pág. 1 de 3

Resp. Téc.: Mauro Machado

Emitido em: 22/11/2013

Lab-nº 13-9086

Análise para caracterização de resíduo

Cliente Fundação COPPETEC
Localização do Projeto Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ
Data da Coleta 16/10/2013
Entrega das amostras 15/10/2013
Início dos ensaios/extração 16/10/2013
Término dos ensaios 22/11/2013

Eurofins Innolab
 Rua Saeadura Cabral - 236
 Saúde - Rio de Janeiro - RJ
 Cep. 20221-161
 CNPJ. 04.183.043/0001-00
 Tel. (21) 3509-1750
 Fax (21) 2233-4621

Projeto Não Fornecido
Gerente do Projeto Laura Motta

1. Introdução

Foram realizados ensaios na amostra coletada para enquadramento de seu resíduo conforme a ABNT NBR-10004:2004.

Identificação da amostra Lodo de Esgoto

2. Ensaios
2.1 – Massa Bruta

Foram realizados os testes para determinação da inflamabilidade, corrosividade e reatividade.

Parâmetros	Massa Bruta		
	Resultado	Unidade	Conclusão
pH	7	-	não corrosivo
Cianeto Liberável	nd	mg/kg	não reativo
Sulfeto Liberável	383,2	mg/kg	não reativo
Ponto de Fulgor	>100	°C	não inflamável

2.2 – Lixiviação

Foi realizado ensaio de lixiviação no resíduo de acordo com a ABNT NBR-10005:2004, onde foi encontrado:

a) Teor de Sólidos Secos (%) 26,6
 b) pH do extrato lixiviado obtido (h) 5,18
 c) Tempo de Lixiviação (h) 18
 d) Volume de Líquido (mL) 1000

No extrato lixiviado foram realizados ensaios químicos e os resultados obtidos para os elementos ensaiados foram comparados com os limites estabelecidos pela NBR 10004:2004 – Anexo F, conforme tabela abaixo:

Boletim de Ensaio

Pág. 2 de 3

Resp. Téc.: Mauro Machado

Emitido em: 22/11/2013

Lab-nº 13-9086

Parâmetros	Resultado	L.M.L.	L.O.
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Inorgânico			
Fluoreto	N.D.	150,0	1,0
Pesticidas			
Clordano (isômeros)	N.D.	0,02	0,00003
2,4-D	N.D.	3,0	0,0025
Heptacloro	N.D.	0,003	0,00003
Heptacloro epóxido			
Metoxicloro	N.D.	2,0	0,00003
Toxafeno	N.D.	0,5	0,005
2,4,5-T	N.D.	0,2	0,0025
2,4,5-TP	N.D.	1,0	0,0025
Outros orgânicos			
hexacloroetano	N.D.	3,0	0,003
metilacetona	N.D.	200,0	0,5
nitrobenzeno	N.D.	2,0	0,003
piridina	N.D.	5,0	0,1

conferido

2.3 – Solubilização

Foi realizado ensaio de solubilização no resíduo de acordo com a ABNT NBR-10006:2004, onde foi encontrado:

a) Teor de Sólidos Secos (%)	26,6
b) pH do extrato obtido	7,3
c) Tempo de Solubilização (d)	7
d) Volume de Líquido (mL)	1000

No extrato solubilizado foram realizados ensaios químicos e os resultados obtidos para os elementos ensaiados foram comparados com os limites estabelecidos pela NBR 10004:2004 – Anexo G, conforme tabela abaixo:

Parâmetro	Resultado	L.M.S	L.O.
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Inorgânico			
Clareto	N.D.	0,070	0,03
Clareto	12,0	250,0	3
Fluoreto	N.D.	1,5	1
Sulfato (expresso em SO ₄)	107,0	250,0	5
Surfactantes	2,28	0,5	0,03
Orgânicos			
Clordano (isômeros)	N.D.	0,00020	0,00003
2,4-D	N.D.	0,03	0,0025
Heptacloro	N.D.	0,00003	0,00003
Heptacloro epóxido			
Metoxicloro	N.D.	0,02	0,00003
Toxafeno	N.D.	0,005	0,005
2,4,5-T	N.D.	0,002	0,0025
2,4,5-TP	N.D.	0,03	0,0025

conferido

Boletim de Ensaio

Pág. 3 de 3

 Resp. Téc.: **Mauro Machado**

Emitido em: 22/11/2013

Lab-nº 13-9086

3. Conclusão

Conforme com os ensaios acima descritos realizados na amostra seguindo as orientações previstas na ABNT NBR 10004:2004, conclui-se que a amostra analisada se enquadra como:

Resíduo Perigoso - Classe I ()
 Resíduo não Inerte - Classe II A (X)
 Resíduo Inerte - Classe II B ()

Observações
<p>1. Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> • L.D. – Limite de detecção reportado • L.Q. – Limite de Quantificação reportado • na – Não analisado • N.D. - Não analisado • D – diluição <p>2. Ref. Métodos – ABNT NBR 10.005:2004 // ABNT NBR 10.006:2004 // ABNT NBR 14599:2000 // US EPA SW 846</p> <p>3. Foram utilizados Branco de Controle conforme metodologia informada.</p> <p>4. O laboratório não é o responsável pela amostragem, portanto, os resultados contidos neste boletim referem-se exclusivamente às amostras não desortizadas, que foram coletadas e enviadas pelo solicitante.</p> <p>5. Os métodos utilizados neste(s) ensaio(s) apresentam-se conformes em relação ao método referenciado. Caso o(s) ensaio(s) tenha(m) apresentado desvio(s), edições ou exclusões, estas estarão listadas no item informações adicionais do relatório.</p> <p>6. Este Boletim de Ensaio só deverá ser reproduzido por completo.</p> <p>7. As metodologias acreditadas poderão ser localizadas no site do INMETRO sob CRL 0310</p>


 Mauro Miranda de Souza
 CRQ 3ª Região: 03211294
 Chefe de Laboratório


 CARINA SANTOS CASAL
 Chefe Laboratório
 Químico
 CRQ - 03251114

Cinza de lodo de ETE



Innolab

Boletim de Ensaio

Emitido em: 14/02/2014

Orçamento Nº: 0421/2014
Amostra Nº: 3365/2014

Análise em amostras de RESÍDUO

Cliente: FUNDAÇÃO COPPETEC
Endereço: CGTEC CT2 Rua Moriz Aragão, 0 3ªm do Fundão - 3ªm do Governador - Rio de Janeiro/RJ - CEP 21941-972
Localização do Projeto: Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ
Data da Coleta: 10/12/2013 00:00
Entrega das amostras: 12/12/13
Início dos ensaios/extração: 06/01/2014
Término dos ensaios: 14/02/2014
Gerente do Projeto: Laura Moita

INNOLAB do Brasil Ltda.
Rua Sacadura Cabral - 236
Santos - Rio de Janeiro - RJ
Cep. 20221-181
CNPJ. 04.189.049/0001-00
Tel. (21) 3509-1750
Fax (21) 2253-4821

Identificação da Amostra: Cinza de lodo de ETE

Análises de Volumetria Não Acreditadas

Parâmetro	Resultado	L.O.	L.D.	Unidade	Método
Cianeto Livre - Volumetria	nd	30,00	10,00	mg/Kg	APHA-AWWA-21ªEd. 4500-CN- C e 4500-CN- D

Análises de Colorimetria Não Acreditadas

Parâmetro	Resultado	L.O.	L.D.	Unidade	Método
Sulfeto Diversos - Colorimetria	0,43	0,300	0,100	mg/Kg	APHA-AWWA-21ªEd. 4500-S2-D

Análises de Líquidos Livres

Parâmetro	Resultado	L.O.	L.D.	Unidade	Método
Líquidos Livres	< 1,000			ml	NBR 12958:2003 Líquidos Livres - Verificação em amostra de resíduo

Análises de pH e outros

Parâmetro	Resultado	Método
pH	8,540	APHA-AWWA-21ªEd 4500-H+ B

Análises de Ponto de Fulgor

Parâmetro	Resultado	L.O.	L.D.	Unidade	Nota
Ponto de Fulgor NBR 10004:2004	> 100			°C	-

Padrões de Controle Analítico (PCA)

	Concentração esperada	Concentração obtida
Cianeto Livre - Volumetria	1,00 mg/Kg	1,041 mg/Kg
Sulfeto Diversos - Colorimetria	0,04 mg/Kg	0,041 mg/Kg

1. Legenda

- L.D. – Limite de detecção reportado
- L.O. – Limite de Quantificação reportado
- na – Não analisado
- nd – Não detectado
- D – diluição

2. Foram utilizados Brancos de Controle conforme metodologia informada.

3. Caso a amostragem não tenha sido realizada pela equipe da Eurofins Innolab, os resultados apresentados referem-se a amostra como recebida.

4. Os métodos utilizados neste(s) ensaio(s) apresentam-se conformes em relação ao método referenciado. Caso o(s) ensaio(s) tenha(m) apresentado desvio(s), adições ou exclusões, estes estarão listados no item informações adicionais do relatório.

5. Os valores para amostras sólidas são reportados em base seca.

6. As metodologias utilizadas nos ensaios encontram-se referenciadas ao final de cada parâmetro. As metodologias acreditadas poderão ser localizadas no site do INMETRO sob CRL 0310.

7. Este Boletim de Ensaio só deverá ser reproduzido por completo.

8. (*) = Análises terceirizadas ou subcontratadas em laboratórios acreditados e homologados pela Eurofins Innolab

Mario Miranda de Souza
Mario Miranda de Souza
CRQ 3ª Região: 1231234
Chefe de Laboratório



Laboratório de Ensaio acreditado
pela Cgcre/Inmetro de acordo com
a ABNT NBR ISO/IEC 17025.



Innolab

Boletim de Ensaio

Emitido em: 14/02/2014

Organismo N°: 0421/2014
Amostra N°: 3368/2014

Análise em amostras de RESÍDUO - LIXIVIADO

Cliente: FUNDAÇÃO COPPETEC
Endereço: CGTEC CT2 Rua Montez Aragão, 0 lha do Fundão - Ilha do Governador - Rio de Janeiro/RJ - CEP 21941-972
Localização do Projeto: Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ
Data da Coleta: 10/12/2013 00:00
Entrega das amostras: 12/12/13
Início dos ensaios/extração: 01/02/2014
Término dos ensaios: 14/02/2014
Gerente do Projeto: Laura Motta

INNOLAB do Brasil Ltda.
Rua Sacadura Cabral - 236
Saúde - Rio de Janeiro - RJ
Cap. 20221-161
CNPJ: 04.183.043/0001-00
Tel. (21) 3508-1750
Fax (21) 2233-4621

Identificação da Amostra: Cinza de lodo de ETE

Análises de Colorimetria Acreditadas

Parâmetro	Resultado	L.Q.	L.D.	Unidade	Método
Merúrio - Colorimetria	nd	0,0005	0,0002	mg/L	MA-071-L2

Análises de Metais Acreditadas

Parâmetro	Resultado	L.Q.	L.D.	Unidade	Método
Ársênio - Metais	nd	0,010	0,007	mg/L	MA-071-L2
Bário - Metais	0,10	0,04	0,02	mg/L	MA-071-L2
Cádmio - Metais	0,038	0,002	0,001	mg/L	MA-071-L2
Chumbo - Metais	0,077	0,006	0,004	mg/L	MA-071-L2
Cromo - Metais	0,004	0,003	0,001	mg/L	MA-071-L2
Prata - Metais	0,003	0,002	0,001	mg/L	MA-071-L2
Selênio - Metais	nd	0,010	0,007	mg/L	MA-071-L2

Padrões de Controle Analítico (PCA)

	Concentração esperada	Concentração obtida
Merúrio - Colorimetria	0,0200 mg/L	0,0217 mg/L

Padrões de Controle Analítico (PCA)

	Concentração esperada	Concentração obtida
Ársênio - Metais	0,0550 mg/L	0,052 mg/L
Bário - Metais	0,38 mg/L	0,380 mg/L
Cádmio - Metais	0,022 mg/L	0,022 mg/L
Chumbo - Metais	0,022 mg/L	0,022 mg/L
Cromo - Metais	0,022 mg/L	0,023 mg/L
Prata - Metais	0,022 mg/L	0,021 mg/L
Selênio - Metais	0,055 mg/L	0,051 mg/L

1. Legenda

- L.D. - Limite de detecção reportado
- L.Q. - Limite de Quantificação reportado
- na - Não analisado
- nd - Não detectado
- D - diluição

2. Foram utilizados Brancos de Controle conforme metodologia informada.

3. Caso a amostragem não tenha sido realizada pela equipe da Eurofins Innolab, os resultados apresentados referem-se a amostra como recebida.

4. Os métodos utilizados neste(s) ensaio(s) apresentam-se conformes em relação ao método referenciado. Caso o(s) ensaio(s) tenha(m) apresentado desvio(s), adições ou exclusões, estes estarão listados no Item Informações Adicionais do relatório.

5. Os valores para amostras sólidas são reportados em base seca.

6. As metodologias utilizadas nos ensaios encontram-se referenciadas ao final de cada parâmetro. As metodologias acreditadas poderão ser localizadas no site do INMETRO sob CRL 0310.

7. Este Boletim de Ensaio só deverá ser reproduzido por completo.

8. (*) = Análises terceirizadas ou subcontratadas em laboratórios acreditados e homologados pela Eurofins Innolab


Mario Miranda de Souza
CRC 3ª Região: 0331204
Chefe de Laboratório

Boletim de Ensaio

Emitido em: 14/02/2014

Orçamento Nº: 0421/2014

Amostra Nº: 3366/2014

Análise em amostras de RESÍDUO - LIXIVIADO

Cliente: FUNDAÇÃO COPPETEC
 Endereço: CGTEC CT2 Rua Montiz Aragão, 0 Ilha do Fundão - Ilha do Governador - Rio de Janeiro/RJ - CEP 21941-972
 Localização do Projeto: Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ
 Data da Coleta: 10/12/2013 00:00
 Entrega das amostras: 12/12/13
 Início dos ensaios/extração: 01/02/2014
 Término dos ensaios: 14/02/2014
 Gerente do Projeto: Laura Motta

INNOLAB do Brasil Ltda.
 Rua Sacadura Cabral - 236
 Saúde - Rio de Janeiro - RJ
 Cep. 20221-161
 CNPJ. 04.183.043/0001-00
 Tel. (21) 3509-1750
 Fax (21) 2233-4621

Identificação da Amostra: Cinza de lodo de ETE
Análise de Colorimetria Não Acreditadas

Parâmetro	Resultado	L.Q.	L.D.	Unidade	Método
Fluoreto - Colorimetria	nd	1,0	0,3	mg/L	APHA-AWWA-21ªEd. - 4500F- C

Padrões de Controle Analítico (PCA)

	Concentração esperada	Concentração obtida
Fluoreto - Colorimetria	2,00 mg/L	1,599 mg/L

1. Legenda

- L.D. – Limite de detecção reportado
- L.Q. – Limite de Quantificação reportado
- na – Não analisado
- nd – Não detectado
- D – diluição

2. Foram utilizados Branco de Controle conforme metodologia informada.

3. Caso a amostragem não tenha sido realizada pela equipe da Eurofins Innolab, os resultados apresentados referem-se a amostra como recebida.

4. Os métodos utilizados neste(s) ensaios(s) apresentam-se conformes em relação ao método referenciado. Caso o(s) ensaio(s) tenha(m) apresentado desvio(s), adições ou exclusões, estes estarão listados no item informações adicionais do relatório.

5. Os valores para amostras sólidas são reportados em base seca.

6. As metodologias utilizadas nos ensaios encontram-se referenciadas ao final de cada parâmetro. As metodologias acreditadas poderão ser localizadas no site do INMETRO sob CRL 0310.

7. Este Boletim de Ensaio só deverá ser reproduzido por completo.

8. (*) = Análises terceirizadas ou subcontratadas em laboratórios acreditados e homologados pela Eurofins Innolab


 Mario Miranda de Souza
 CRC 3ª Região: 22317254
 Chefe de Laboratório



Laboratório de Ensaio acreditado
pela Cgcre/Inmetro de acordo com
a ABNT NBR ISO/IEC 17025.



Innolab

Boletim de Ensaio

Emitido em: 14/02/2014

Orçamento Nº: 0421/2014
Amostra Nº: 3367/2014

Análise em amostras de RESÍDUO - SOLUBILIZADO

Cliente: FUNDAÇÃO COPPETEC
Endereço: CGTEC CT2 Rua Moniz Aragão, 0 Ilha do Fundão - Ilha do Governador - Rio de Janeiro/RJ - CEP 21941-972
Localização do Projeto: Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ
Data da Coleta: 10/12/2013 00:00
Entrega das amostras: 12/12/13
Info dos ensaios/extração: 01/02/2014
Término dos ensaios: 14/02/2014
Gerente do Projeto: Laura Motz

INNOLAB do Brasil Ltda.
Rua Sacadura Cabral - 236
Saúde - Rio de Janeiro - RJ
Cep. 20221-161
CNPJ. 04.183.043/0001-00
Tel. (21) 3509-1750
Fax (21) 2233-4821

Identificação da Amostra: Cinza do todo de ETE

Análises de Colorimetria Acreditadas

Parâmetro	Resultado	L. Q.	L. D.	Unidade	Método
Fenol - Colorimetria	nd	0,0010	0,0005	mg/L	MA - 013 - L2
Mercurio - Colorimetria	nd	0,0005	0,0002	mg/L	MA-071-L2
Nitrito - Colorimetria	nd	0,010	0,005	mg/l	MA - 017 - L2
Nitrato + Nitrito - Colorimetria	0,02	0,010	0,005	mg/l	MA - 017 - L2

Análises de Diferença Acreditadas

Parâmetro	Resultado	L. Q.	L. D.	Unidade	Método
Nitrato - Diferença	0,022	0,010	0,005	mg/L	MA - 017 - L2

Análises de Metais Acreditadas

Parâmetro	Resultado	L. Q.	L. D.	Unidade	Método
Alumínio - Metais	nd	0,02	0,01	mg/L	MA-071-L2
Arsênio - Metais	nd	0,010	0,007	mg/L	MA-071-L2
Bário - Metais	0,06	0,04	0,02	mg/L	MA-071-L2
Cádmio - Metais	nd	0,002	0,001	mg/L	MA-071-L2
Chumbo - Metais	nd	0,006	0,004	mg/L	MA-071-L2
Cobre - Metais	nd	0,002	0,001	mg/L	MA-071-L2
Cromo - Metais	nd	0,008	0,001	mg/L	MA-071-L2
Ferro - Metais	nd	0,03	0,02	mg/L	MA-071-L2
Manganês - Metais	0,374	0,005	0,003	mg/l	MA-071-L2
Prata - Metais	0,004	0,002	0,001	mg/L	MA-071-L2
Selênio - Metais	< 0,010	0,010	0,007	mg/L	MA-071-L2
Sódio - Metais	4,68	0,04	0,02	mg/L	MA-071-L2
Zinco - Metais	0,042	0,003	0,004	mg/L	MA-071-L2

Padrões de Controle Analítico (PCA)

	Concentração esperada	Concentração obtida
Fenol - Colorimetria	0,025 mg/L	0,028 mg/L
Mercurio - Colorimetria	0,0200 mg/L	0,0217 mg/L
Nitrito - Colorimetria	0,10 mg/L	0,105 mg/L
Nitrato + Nitrito - Colorimetria	0,10 mg/L	0,113 mg/L

Padrões de Controle Analítico (PCA)

	Concentração esperada	Concentração obtida

Padrões de Controle Analítico (PCA)

	Concentração esperada	Concentração obtida
Alumínio - Metais	0,33 mg/L	0,354 mg/L
Arsênio - Metais	0,0550 mg/L	0,053 mg/L
Urânio - Metais	0,33 mg/L	0,343 mg/L
Cádmio - Metais	0,022 mg/L	0,020 mg/L
Chumbo - Metais	0,022 mg/L	0,022 mg/L
Cobalto - Metais	0,022 mg/L	0,020 mg/L
Cromo - Metais	0,022 mg/L	0,021 mg/L
Ferro - Metais	0,33 mg/L	0,319 mg/L
Manganês - Metais	0,022 mg/L	0,021 mg/L
Prata - Metais	0,022 mg/L	0,008 mg/L
Selênio - Metais	0,055 mg/L	0,053 mg/L
Sódio - Metais	0,33 mg/L	0,037 mg/L
Zinco - Metais	0,022 mg/L	0,023 mg/L

1. Legenda

- L.D. – Limite de detecção reportado
- L.Q. – Limite de Quantificação reportado
- na – Não analisado
- nd – Não detectado
- D – diluição

2. Foram utilizados Branco de Controle conforme metodologia Informada.

3. Caso a amostragem não tenha sido realizada pela equipe da Eurofins Innolab, os resultados apresentados referem-se a amostra como recebida.

4. Os métodos utilizados neste(s) ensaio(s) apresentam-se conformes em relação ao método referenciado. Caso o(s) ensaio(s) tenha(m) apresentado desvio(s), adições ou exclusões, estas estarão listadas no item informações adicionais do relatório.

5. Os valores para amostras sólidas são reportados em base seca.

6. As metodologias utilizadas nos ensaios encontram-se referenciadas ao final de cada parâmetro. As metodologias acreditadas poderão ser localizadas no site do INMETRO sob CRL 0310.

7. Este Boletim de Ensaio só deverá ser reproduzido por completo.

8. (*) = Análises terceirizadas ou subcontratadas em laboratórios acreditados e homologados pela Eurofins Innolab



Boletim de Ensaio

Emitido em: 14/02/2014

Orçamento Nº: 0421/2014

Amostra Nº: 3367/2014

Análise em amostras de RESÍDUO - SOLUBILIZADO

Cliente: FUNDAÇÃO COPPETEC

Endereço: CGTEC CT2 Rua Mariz Aragão, 0 Ilha do Fundão - Ilha do Governador - Rio de Janeiro/RJ - CEP 21941-672

Localização do Projeto: Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ

Data da Coleta: 10/12/2013 00:00

Entrega das amostras: 12/12/13

Início dos ensaios/relatório: 01/12/2014

Término dos ensaios: 14/02/2014

Gerente do Projeto: Laura Motta

 INNOLAB do Brasil Ltda.
 Rua Sacadura Cabral - 236
 Saúde - Rio de Janeiro - RJ
 Cep. 20221-161
 CNPJ. 04.183.043/0001-00
 Tel. (21) 3609-1760
 Fax (21) 2228-4621

Identificação da Amostra: Cinza de Iodo de ETE
Análises de Volumetria Não Acreditadas

Parâmetro	Resultado	L.Q.	L.D.	Unidade	Método
Cianeto Total - Volumetria	< 0,20	0,20	0,05	mg/L	APHA-AWWA-21ªEd. 4600-CN- C e 4500-CN- D

Análises de Colorimetria Não Acreditadas

Parâmetro	Resultado	L.Q.	L.D.	Unidade	Método
Cloreto - Colorimetria	84,26	3	1	mg/L	ION SELETIVO
Substâncias Tensioativas que reagem com azul de metileno	0,05	0,03	0,01	mg/L	APHA-AWWA-21ªEd. - 5540C
Fluoreto - Colorimetria	nd	1,0	0,3	mg/L	APHA-AWWA-21ªEd. - 4500F- C
Sulfato - Colorimetria	3440,23	5	1	mg/L	APHA-AWWA-21ªEd. - 4500-SO4= E

Padrões de Controle Analítico (PCA)

	Concentração separada	Concentração obtida
Cianeto Total - Volumetria	1,00 mg/L	1,041 mg/L
Cloreto - Colorimetria	10,00 mg/L	10,034 mg/L
Substâncias Tensioativas que reagem com azul de metileno	0,10 mg/L	0,096 mg/L
Fluoreto - Colorimetria	2,00 mg/L	2,000 mg/L
Sulfato - Colorimetria	20,00 mg/L	20,233 mg/L

1. Legenda

- L.D. – Limite de detecção reportado
- L.Q. – Limite de Quantificação reportado
- na – Não analisado
- nd – Não detectado
- D – diluição

2. Foram utilizados Branco de Controle conforme metodologia Informada.

3. Caso a amostragem não tenha sido realizada pela equipe da Eurofins Innolab, os resultados apresentados referem-se a amostra como recebida.


4. Os métodos utilizados neste(s) ensaio(s) apresentam-se conformes em relação ao método referenciado. Caso o(s) ensaio(s) tenha(m) apresentado desvio(s), adições ou exclusões, estas estarão listadas no item Informações adicionais do relatório.

5. Os valores para amostras sólidas são reportados em base seca.

6. As metodologias utilizadas nos ensaios encontram-se referenciadas ao final de cada parâmetro. As metodologias acreditadas poderão ser localizadas no site do INMETRO sob CRL 0310.

7. Este Boletim de Ensaio só deverá ser reproduzido por completo.

8. (*) = Análises terceirizadas ou subcontratadas em laboratórios acreditados e homologados pela Eurofins Innolab



Marco Mirandino Santos
 00001946/2014
 Gerente de Laboratório

ANEXO D

Relatórios técnicos do dimensionamento de pavimentos- SisPav (2013)

Programa SisPavBR versão: 2.0.6.0

Projeto:

Análise realizada em 23/02/2014 às 20:15:31

Resumo da análise

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos no SisPavBR.

Danos Críticos no Pavimento: 98,92% com confiabilidade de 85%

Fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y)

Vida de projeto estimada em 10,1 ano(s)

Flow Number das misturas asfálticas > 300 ciclos

Estrutura do Pavimento Analisada

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo (MPa)	Coef Poisson	Propriedades
1	CONCRETO ASFÁLTICO	4,00	Resiliente Linear MR = 4193,00	0,3400	Tipo de CAP = CAP 50/70 Faixa Granulométrica = Faixa B Norma ou Especificação = -
2	MATERIAL GRANULAR	14,70	Resiliente Não Linear $k_1 = 4798,6400$ $k_2 = 0,6160$ $k_3 = 0,0380$ $k_4 = 0,0000$	0,3500	Material = Estabilizado granulometricamente Faixa Granulométrica = Faixa Abrasão Los Angeles (%) = 40,0 Norma ou Especificação = -
3	SUBLEITO	0,00	Resiliente Linear MR = 50,00	0,4000	Material = Solo... CBR (%) = 3 Expansão (%) = 2,0 Norma ou Especificação = -

Modelagem do Pavimento**CONCRETO ASFÁLTICO**

Modelo	Parâmetros
Fadiga de Misturas Asfálticas	Considerar no projeto: SIM Modelo: COPPE (2013) Fator Campo-Laboratório (fcl): 10000,00 Coeficiente de Regressão (k1): 1,904e-6 Coeficiente de Regressão (k2): -2,821 Coeficiente de Regressão (k3): -0,740 Correlação (R²): 0,805 Erro padrão (%): 40,0

MATERIAL GRANULAR

Modelo	Parâmetros
Deformação Permanente	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fcl): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,079 Coeficiente de Regressão (k2): -0,596 Coeficiente de Regressão (k3): 1,243 Coeficiente de Regressão (k4): 0,081 Correlação (R²): 0,951 Erro padrão (%): 40,0

SUBLEITO

Modelo	Parâmetros
Tensão Admissível no Topo do Subleito	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fc): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,643 Coeficiente de Regressão (k2): 0,093 Coeficiente de Regressão (k3): 1,579 Coeficiente de Regressão (k4): 0,055 Correlação (R²): 0,909 Erro padrão (%): 40,0
Deformação Permanente	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fc): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,643 Coeficiente de Regressão (k2): 0,093 Coeficiente de Regressão (k3): 1,579 Coeficiente de Regressão (k4): 0,055 Correlação (R²): 0,909 Erro padrão (%): 40,0

Dados do Tráfego

Variação lateral do tráfego: 30 cm

% de veículos na faixa de tráfego: 100%

Alinhamento crítico: 0.00 cm

Condições do tráfego: Normal

Período do projeto (anos): 10

Número equivalente de eixos (DNIT): $N = 1,426e+006$

Eixo	Tipo	Rodas	Volume (1º ano)	Taxa (%aa)	Peso (ton)	Pressão (MPa)	Sx (cm)	Sy (cm)
1	Eixo padrão rodoviário	2	150000	0,000	8200,00	0,560	0,3240	0,0000

Fatores Climáticos RegionaisRegião de implantação do pavimento: **Rio de Janeiro**Mês de abertura ao tráfego: **Jan**Temperatura Média Anual do Ar: **25,983 °C**

Temperaturas Médias Mensais do Ar - TMMa (°C)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
26,200	26,500	26,000	24,500	23,000	21,500	21,300	21,800	21,600	22,800	24,200	25,200

Resumo dos danos no pavimento

Eixo	Fadiga Revest X	Fadiga Revest Y	Tensão Máx Subleito
1	29,774	98,921	0,000
Total	29,774	98,921	0,000

Programa SisPavBR versão: 2.0.6.0

Projeto:

Análise realizada em 23/02/2014 às 20:28:17

Resumo da análise

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos no SisPavBR.

Dano Crítico no Pavimento: 100,70% com confiabilidade de 85%

Fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y)

Vida de projeto estimada em 9,9 ano(s)

Flow Number das misturas asfálticas > 300 ciclos

Estrutura do Pavimento Analisada

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo (MPa)	Coef Poisson	Propriedades
1	CONCRETO ASFÁLTICO	10,00	Resiliente Linear MR = 4193,00	0,3400	Tipo de CAP = CAP 50/70 Faixa Granulométrica = Faixa B Norma ou Especificação = -
2	MATERIAL GRANULAR	29,20	Resiliente Não Linear k1 = 702,3900 k2 = 0,4170 k3 = -0,2020 k4 = 0,0000	0,3500	Material = Faixa Granulométrica = Abrasão Los Angeles (%) = Norma ou Especificação = -
3	MATERIAL GRANULAR	20,00	Resiliente Não Linear k1 = 689,1600 k2 = 0,4200 k3 = -0,0650 k4 = 0,0000	0,3500	Material = Estabilizado granulometricamente Faixa Granulométrica = Faixa Abrasão Los Angeles (%) = 40,0 Norma ou Especificação = -
4	SUBLEITO	0,00	Resiliente Linear MR = 150,00	0,4000	Material = Solo... CBR (%) = 3 Expansão (%) = 2,0 Norma ou Especificação = -

Modelagem do Pavimento**CONCRETO ASFÁLTICO**

Modelo	Parâmetros
Fadiga de Misturas Asfálticas	Considerar no projeto: SIM Modelo: COPPE (2013) Fator Campo-Laboratório (fd): 10000,00 Coeficiente de Regressão (k1): 1,904e-6 Coeficiente de Regressão (k2): -2,821 Coeficiente de Regressão (k3): -0,740 Correlação (R²): 0,805 Erro padrão (%): 40,0

MATERIAL GRANULAR

Modelo	Parâmetros
	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fd): 1,00

Deformação Permanente	Coeficiente de Regressão (k1): 0,079 Coeficiente de Regressão (k2): -0,598 Coeficiente de Regressão (k3): 1,243 Coeficiente de Regressão (k4): 0,081 Correlação (R ²): 0,951 Erro padrão (%): 40,0
-----------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

MATERIAL GRANULAR

Modelo	Parâmetros
Deformação Permanente	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fd): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,079 Coeficiente de Regressão (k2): -0,598 Coeficiente de Regressão (k3): 1,243 Coeficiente de Regressão (k4): 0,081 Correlação (R ²): 0,951 Erro padrão (%): 40,0

SUBLEITO

Modelo	Parâmetros
Tensão Admissível no Topo do Subleito	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fd): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,643 Coeficiente de Regressão (k2): 0,093 Coeficiente de Regressão (k3): 1,579 Coeficiente de Regressão (k4): 0,055 Correlação (R ²): 0,909 Erro padrão (%): 40,0
Deformação Permanente	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fd): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,643 Coeficiente de Regressão (k2): 0,093 Coeficiente de Regressão (k3): 1,579 Coeficiente de Regressão (k4): 0,055 Correlação (R ²): 0,909 Erro padrão (%): 40,0

Dados do Tráfego

Variação lateral do tráfego: 30 cm

% de veículos na faixa de tráfego: 100%

Alinhamento crítico: 0,00 cm

Condições do tráfego: Normal

Período de projeto (anos): 10

Número equivalente de eixos (DNIT): N = 1,046e+006

Eixo	Tipo	Rodas	Volume (1º ano)	Taxa (%aa)	Peso (ton)	Pressão (MPa)	Sx (cm)	Sy (cm)
1	Eixo padrão rodoviário	2	110000	0,000	8200,00	0,560	0,3240	0,0000

Fatores Climáticos RegionaisRegião de implantação do pavimento: **Rio de Janeiro**

Mês de abertura ao tráfego: **Jan**

Temperatura Média Anual do Ar: **25,983 °C**

Temperaturas Médias Mensais do Ar - TMMA (°C)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
26,200	26,500	26,000	24,500	23,000	21,500	21,300	21,600	21,800	22,800	24,200	25,200

Resumo dos danos no pavimento

Eixo	Fadiga Revest X	Fadiga Revest Y	Tensão Máx Subleito
1	13,545	100,696	0,000
Total	13,545	100,696	0,000

Programa SisPavBR versão: 2.0.6.0

Projeto:

Análise realizada em 19/02/2014 às 00:51:51

Resumo da análise

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos no SisPavBR.

Dano Crítico no Pavimento: 101,30% com confiabilidade de 85%

Fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y)

Vida de projeto estimada em 9,9 ano(s)

Flow Number das misturas asfálticas > 300 ciclos

Estrutura do Pavimento Analisada

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo (MPa)	Coef Poisson	Propriedades
1	CONCRETO ASFÁLTICO	10,00	Resiliente Linear MR = 4193,00	0,3400	Tipo de CAP = CAP 50/70 Faixa Granulométrica = Faixa B Norma ou Especificação = -
2	MATERIAL GRANULAR	39,71	Resiliente Não Linear k1 = 702,3900 k2 = 0,4170 k3 = -0,2000 k4 = 0,0000	0,3500	Material = Faixa Granulométrica = Abrasão Los Angeles (%) = Norma ou Especificação = -
3	MATERIAL GRANULAR	30,00	Resiliente Não Linear k1 = 2706,1400 k2 = 0,8860 k3 = -0,0320 k4 = 0,0000	0,3500	Material = Estabilizado granulometricamente Faixa Granulométrica = Faixa Abrasão Los Angeles (%) = 40,0 Norma ou Especificação = -
4	MATERIAL GRANULAR	10,00	Resiliente Não Linear k1 = 841,3000 k2 = 0,5750 k3 = -0,1520 k4 = 0,0000	0,3500	Material = Estabilizado granulometricamente Faixa Granulométrica = Faixa Abrasão Los Angeles (%) = 40,0 Norma ou Especificação = -
5	SUBLEITO	0,00	Resiliente Linear MR = 300,00	0,4000	Material = Solo... CBR (%) = 3 Expansão (%) = 2,0 Norma ou Especificação = -

Modelagem do Pavimento**CONCRETO ASFÁLTICO**

Modelo	Parâmetros
Fadiga de Misturas Asfálticas	Considerar no projeto: SIM Modelo: COPPE (2013) Fator Campo-Laboratório (fd): 10000,00 Coeficiente de Regressão (k1): 1,904e-6 Coeficiente de Regressão (k2): -2,821 Coeficiente de Regressão (k3): -0,740 Correlação (R²): 0,805 Erro padrão (%): 40,0

MATERIAL GRANULAR

Modelo	Parâmetros
Deformação Permanente	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fd): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,079 Coeficiente de Regressão (k2): -0,598 Coeficiente de Regressão (k3): 1,243 Coeficiente de Regressão (k4): 0,081 Correlação (R²): 0,951 Erro padrão (%): 40,0

MATERIAL GRANULAR

Modelo	Parâmetros
Deformação Permanente	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fd): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,079 Coeficiente de Regressão (k2): -0,598 Coeficiente de Regressão (k3): 1,243 Coeficiente de Regressão (k4): 0,081 Correlação (R²): 0,951 Erro padrão (%): 40,0

MATERIAL GRANULAR

Modelo	Parâmetros
Deformação Permanente	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fd): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,079 Coeficiente de Regressão (k2): -0,598 Coeficiente de Regressão (k3): 1,243 Coeficiente de Regressão (k4): 0,081 Correlação (R²): 0,951 Erro padrão (%): 40,0

SUBLEITO

Modelo	Parâmetros
Tensão Admissível no Topo do Subleito	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fd): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,643 Coeficiente de Regressão (k2): 0,093 Coeficiente de Regressão (k3): 1,579 Coeficiente de Regressão (k4): 0,055 Correlação (R²): 0,909 Erro padrão (%): 40,0
Deformação Permanente	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fd): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,643 Coeficiente de Regressão (k2): 0,093 Coeficiente de Regressão (k3): 1,579 Coeficiente de Regressão (k4): 0,055 Correlação (R²): 0,909 Erro padrão (%): 40,0

Dados do Tráfego

Varição lateral do tráfego: 30 cm
 % de veículos na faixa de tráfego: 100%
 Alinhamento crítico: 0.00 cm
 Condições do tráfego: Normal
 Período de projeto (anos): 10
 Número equivalente de eixos (DNIT): $N = 1,046e+006$

Eixo	Tipo	Rodas	Volume (1º ano)	Taxa (%aa)	Peso (ton)	Pressão (MPa)	Sx (cm)	Sy (cm)
1	Eixo padrão rodoviário	2	110000	0,000	8200,00	0,560	0,3240	0,0000

Fatores Climáticos Regionais

Região de implantação do pavimento: **Rio de Janeiro**
 Mês de abertura ao tráfego: **Jan**
 Temperatura Média Anual do Ar: **25,983 °C**
 Temperaturas Médias Mensais do Ar - TMMa (°C)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
26,200	26,500	26,000	24,500	23,000	21,500	21,300	21,800	21,800	22,800	24,200	25,200

Resumo dos danos no pavimento

Eixo	Fadiga Revest X	Fadiga Revest Y	Tensão Máx Subleito
1	13,696	101,303	0,000
Total	13,696	101,303	0,000

Programa SisPavBR versão: 2.0.6.0

Projeto:

Análise realizada em 19/02/2014 às 00:41:25

Resumo da análise

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos no SisPavBR.

Dano Crítico no Pavimento: 100,40% com confiabilidade de 85%

Fadiga na base do revestimento asfáltico (ebco Y)

Vida de projeto estimada em 10,0 ano(s)

Flow Number das misturas asfálticas > 300 ciclos

Estrutura do Pavimento Analisada

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo (MPa)	Coef Poisson	Propriedades
1	CONCRETO ASFÁLTICO	10,00	Resiliente Linear MR = 4193,00	0,3400	Tipo de CAP = CAP 50/70 Faixa Granulométrica = Faixa B Norma ou Especificação = -
2	MATERIAL GRANULAR	40,00	Resiliente Não Linear k1 = 702,3900 k2 = 0,4170 k3 = -0,2020 k4 = 0,0000	0,3500	Material = Faixa Granulométrica = Abrasão Los Angeles (%) = Norma ou Especificação = -
3	MATERIAL GRANULAR	30,00	Resiliente Não Linear k1 = 2706,1400 k2 = 0,8860 k3 = -0,0320 k4 = 0,0000	0,3500	Material = Estabilizado granulometricamente Faixa Granulométrica = Faixa Abrasão Los Angeles (%) = 40,0 Norma ou Especificação = -
4	SUBLEITO	0,00	Resiliente Linear MR = 50,00	0,4000	Material = Solo... CBR (%) = 3 Expansão (%) = 2,0 Norma ou Especificação = -

Modelagem do Pavimento**CONCRETO ASFÁLTICO**

Modelo	Parâmetros
Fadiga de Misturas Asfálticas	Considerar no projeto: SIM Modelo: COPPE (2013) Fator Campo-Laboratório (fcl): 10000,00 Coeficiente de Regressão (k1): 1,904e-6 Coeficiente de Regressão (k2): -2,821 Coeficiente de Regressão (k3): -0,740 Correlação (R²): 0,805 Erro padrão (%): 40,0

MATERIAL GRANULAR

Modelo	Parâmetros
	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fcl): 1,00

Deformação Permanente	Coeficiente de Regressão (k1): 0,079 Coeficiente de Regressão (k2): -0,598 Coeficiente de Regressão (k3): 1,243 Coeficiente de Regressão (k4): 0,081 Correlação (R²): 0,951 Erro padrão (%): 40,0
-----------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

MATERIAL GRANULAR

Modelo	Parâmetros
Deformação Permanente	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fd): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,079 Coeficiente de Regressão (k2): -0,598 Coeficiente de Regressão (k3): 1,243 Coeficiente de Regressão (k4): 0,081 Correlação (R²): 0,951 Erro padrão (%): 40,0

SUBLEITO

Modelo	Parâmetros
Tensão Admissível no Topo do Subleito	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fd): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,643 Coeficiente de Regressão (k2): 0,093 Coeficiente de Regressão (k3): 1,579 Coeficiente de Regressão (k4): 0,055 Correlação (R²): 0,909 Erro padrão (%): 40,0
Deformação Permanente	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fd): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,643 Coeficiente de Regressão (k2): 0,093 Coeficiente de Regressão (k3): 1,579 Coeficiente de Regressão (k4): 0,055 Correlação (R²): 0,909 Erro padrão (%): 40,0

Dados do Tráfego

Variação lateral do tráfego: 30 cm
 % de veículos na faixa de tráfego: 100%
 Alinhamento crítico: 0.00 cm
 Condições do tráfego: Normal
 Período de projeto (anos): 10
 Número equivalente de eixos (DNIT): $N = 1,046e+006$

Eixo	Tipo	Rodas	Volume (1º ano)	Taxa (%aa)	Peso (ton)	Pressão (MPa)	Sx (cm)	Sy (cm)
1	Eixo padrão rodoviário	2	110000	0,000	8200,00	0,560	0,3240	0,0000

Fatores Climáticos Regionais

Região de Implantação do pavimento: **Rio de Janeiro**

Mês de abertura ao tráfego: **Jan**

Temperatura Média Anual do Ar: **25,983 °C**

Temperaturas Médias Mensais do Ar - TMMa (°C)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
26,200	26,500	26,000	24,500	23,000	21,500	21,300	21,800	21,800	22,800	24,200	25,200

Resumo dos danos no pavimento

Eixo	Fadiga Revest X	Fadiga Revest Y	Tensão Máx Subleito
1	13,541	100,402	0,000
Total	13,541	100,402	0,000

Programa SisPavBR versão: 2.0.6.0

Projeto:

Análise realizada em: 23/02/2014 às 20:59:28

Resumo da análise

Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos no SisPavBR.

Dano Crítico no Pavimento: 99,66% com confiabilidade de 85%

Fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y)

Vida de projeto estimada em 10,0 ano(s)

Flow Number das misturas asfálticas > 300 ciclos

Estrutura do Pavimento Analisada

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo (MPa)	Coef Poisson	Propriedades
1	CONCRETO ASFÁLTICO	8,00	Resiliente Linear MR = 4193,00	0,3400	Tipo de CAP = CAP 50/70 Faixa Granulométrica = Faixa B Norma ou Especificação = -
2	MATERIAL GRANULAR	28,80	Resiliente Não Linear k1 = 2083,8300 k2 = 0,4730 k3 = 0,0300 k4 = 0,0000	0,3500	Material = Faixa Granulométrica = Abrasão Los Angeles (%) = Norma ou Especificação = -
3	MATERIAL GRANULAR	20,00	Resiliente Não Linear k1 = 841,3000 k2 = 0,5750 k3 = -0,1520 k4 = 0,0000	0,3500	Material = Estabilizado granulometricamente Faixa Granulométrica = Faixa Abrasão Los Angeles (%) = 40,0 Norma ou Especificação = -
4	SUBLEITO	0,00	Resiliente Linear MR = 300,00	0,4000	Material = Solo... CBR (%) = 3 Expansão (%) = 2,0 Norma ou Especificação = -

Modelagem do Pavimento**CONCRETO ASFÁLTICO**

Modelo	Parâmetros
Fadiga de Misturas Asfálticas	Considerar no projeto: SIM Modelo: COPPE (2013) Fator Campo-Laboratório (fcl): 10000,00 Coeficiente de Regressão (k1): 1,904e-6 Coeficiente de Regressão (k2): -2,821 Coeficiente de Regressão (k3): -0,740 Correlação (R²): 0,805 Erro padrão (%): 40,0

MATERIAL GRANULAR

Modelo	Parâmetros
	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fcl): 1,00

Deformação Permanente	Coeficiente de Regressão (k1): 0,079 Coeficiente de Regressão (k2): -0,598 Coeficiente de Regressão (k3): 1,243 Coeficiente de Regressão (k4): 0,081 Correlação (R²): 0,951 Erro padrão (%): 40,0
-----------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

MATERIAL GRANULAR

Modelo	Parâmetros
Deformação Permanente	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fc): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,079 Coeficiente de Regressão (k2): -0,598 Coeficiente de Regressão (k3): 1,243 Coeficiente de Regressão (k4): 0,081 Correlação (R²): 0,951 Erro padrão (%): 40,0

SUBLEITO

Modelo	Parâmetros
Tensão Admissível no Topo do Subleito	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fc): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,643 Coeficiente de Regressão (k2): 0,093 Coeficiente de Regressão (k3): 1,579 Coeficiente de Regressão (k4): 0,055 Correlação (R²): 0,909 Erro padrão (%): 40,0
Deformação Permanente	Considerar no projeto: SIM Modelo: Guimarães (2009) Fator Campo-Laboratório (fc): 1,00 Coeficiente de Regressão (k1): 0,643 Coeficiente de Regressão (k2): 0,093 Coeficiente de Regressão (k3): 1,579 Coeficiente de Regressão (k4): 0,055 Correlação (R²): 0,909 Erro padrão (%): 40,0

Dados do Tráfego

Variação lateral do tráfego: 30 cm
 % de veículos na faixa de tráfego: 100%
 Alinhamento crítico: 0.00 cm
 Condições do tráfego: Normal
 Período de projeto (anos): 10
 Número equivalente de eixos (DNIT): $N = 1,046e+006$

Eixo	Tipo	Rodas	Volume (1º ano)	Taxa (%aa)	Peso (ton)	Pressão (MPa)	Sx (cm)	Sy (cm)
1	Eixo padrão rodoviário	2	110000	0,000	8200,00	0,560	0,3240	0,0000

Fatores Climáticos Regionais

Região de implantação do pavimento: **Rio de Janeiro**

Mês de abertura ao tráfego: **Jan**

Temperatura Média Anual do Ar: **25,983 °C**

Temperaturas Médias Mensais do Ar - TMA (°C)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
26,200	26,500	26,000	24,500	23,000	21,500	21,300	21,800	21,800	22,800	24,200	25,200

Resumo dos danos no pavimento

Eixo	Fadiga Revest X	Fadiga Revest Y	Tensão Máx Subleito
1	15,712	99,660	0,000
Total	15,712	99,660	0,000